

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение
высшего профессионального образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Методические указания к лабораторной работе
для студентов специальности 210601.65 - Радиоэлектронные
системы и комплексы

2014

Арестов, Сергей Иннокентьевич
Шангин, Александр Сергеевич

Исследование частотных свойств биполярного транзистора: методические указания к лабораторной работе для студентов специальности 210601.65 - Радиоэлектронные системы и комплексы // С.И. Арестов, А.С. Шангин; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск: ТУСУР, 2014. - 16 с.

Целью данной работы является ознакомление с частотными свойствами биполярного транзистора и методикой их измерений.

Биполярные транзисторы являются наиболее распространенными активными элементами современной полупроводниковой электроники. Биполярные транзисторы являются основными элементами большей части полупроводниковых интегральных схем (ИС) (операционных усилителей, цифровых ИС на основе транзисторно-транзисторной, эмиттерно-связанной логики, схем с инжекционным питанием и др.).

Среди важнейших характеристик биполярного транзистора находятся частные зависимости его основных параметров от рабочей частоты, предельные частоты усиления и генерации.

Пособие предназначено для студентов очной формы и заочной формы обучения, обучающихся по специальности 210601.65 - Радиоэлектронные системы и комплексы по дисциплине «Электроника 2. Электронные приборы»

© Арестов Сергей Иннокентьевич, 2014
© Шангин Александр Сергеевич, 2014

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой ЭП
_____ С.М. Шандаров
« ___ » _____ 2014 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Методические указания к лабораторной работе
для студентов специальности 210601.65 - Радиоэлектронные системы и
комплексы

Разработчик
_____ С.И. Арестов
_____ А.С. Шангин
_____ 2014 г

Содержание

1 Введение.....	5
2 Теоретическая часть.....	5
2.1 Основные параметры транзистора и их зависимость от частоты.....	5
2.2 Зависимость частотных свойств транзистора от режима работы.....	7
2.3 Методы измерения частотных свойств биполярных транзисторов	8
2.4 Контрольные вопросы.....	10
3 Экспериментальная часть.....	11
3.2 Оборудование.....	11
3.3 Методические указания к выполнению лабораторной работы	13
3.4 Требования к отчету	14
Рекомендуемая литература	14

1 Введение

Биполярные транзисторы являются наиболее распространенными активными элементами современной полупроводниковой электроники. Биполярные транзисторы являются основными элементами большей части полупроводниковых интегральных схем (ИС) (операционных усилителей, цифровых ИС на основе транзисторно-транзисторной, эмиттерно-связанной логики, схем с инжекционным питанием и др.).

Среди важнейших характеристик биполярного транзистора находятся частные зависимости его основных параметров от рабочей частоты, предельные частоты усиления и генерации.

Целью данной работы является ознакомление с частотными свойствами биполярного транзистора и методикой их измерений.

В ходе выполнения работы у студентов формируется:

- готовность учитывать современные тенденции развития электроники, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий в своей профессиональной деятельности (ПК-3);
- способность разрабатывать структурные и функциональные схемы радиоэлектронных систем и комплексов, а также принципиальные схемы радиоэлектронных устройств (ПК-9);
- способность участвовать в наладке, испытаниях и сдаче в эксплуатацию опытных образцов радиоэлектронных устройств и систем (ПК-13);

2 Теоретическая часть

2.1 Основные параметры транзистора и их зависимость от частоты

Биполярный транзистор – полупроводниковый прибор с тремя электродами, выполненный на основе двух близкорасположенных, взаимодействующих р-п переходов. Различают кремниевые и германиевые транзисторы. Они бывают р-п-р и п-р-п типа.

Основные параметры транзистора:

крутизна: $S = \frac{\partial I_K}{\partial U_{БЭ}}$, при $U_{КЭ} = const$

дифференциальное входное сопротивление:

$$r_{БЭ} = \frac{\partial U_{БЭ}}{\partial I_{КЭ}}, \text{ при } U_{КЭ} = const$$

дифференциальное выходное сопротивление:

$$r_{КЭ} = \frac{\partial U_{КЭ}}{\partial I_{КЭ}}, \text{ при } U_{БЭ} = const$$

дифференциальный коэффициент усиления тока базы:

$$\beta = \frac{\partial I_K}{\partial I_B}, \text{ при } U_{КЭ} = const$$

При разработке схем, рабочая частота которых превышает 100 кГц, следует принимать во внимание некоторые их особенности. Можно выделить две основные причины, которые оказывают влияние на максимальную величину рабочей частоты $|f|$:

- 1) частотная зависимость коэффициента усиления по току реального транзистора, которая определяется их технологическими параметрами;
- 2) наличие паразитных емкостей, которые с внешними сопротивлениями образуют фильтры нижних частот.

Частотную характеристику коэффициента усиления по току для биполярного транзистора с достаточной степенью точности можно аппроксимировать фильтром нижних частот первого порядка:

$$\beta_f = \frac{\beta}{1 + j\left(\frac{f}{f_\beta}\right)}, \quad (2.1)$$

где β - коэффициент усиления по току на низких частотах;

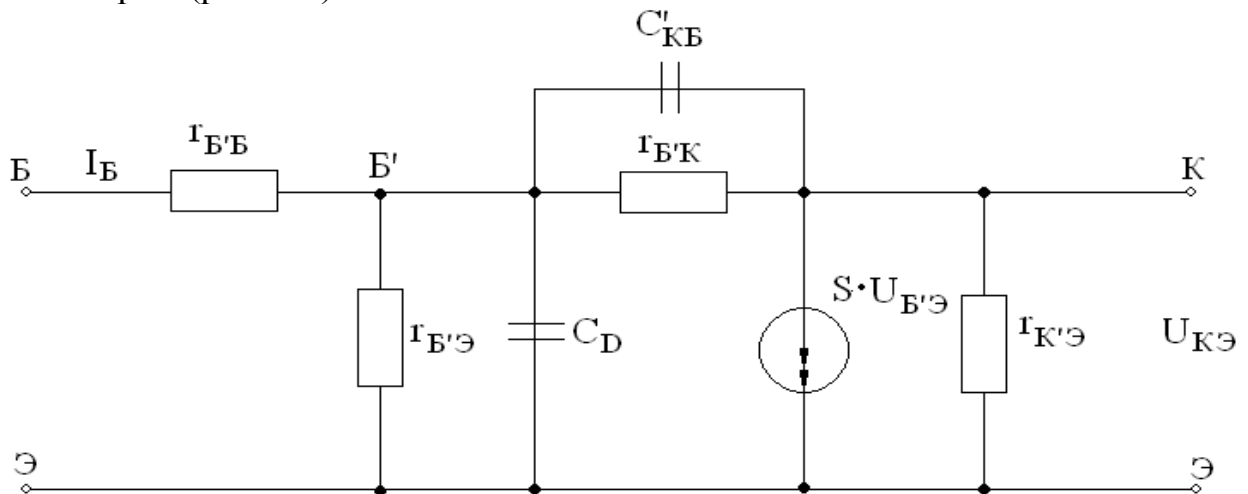
f_β - частота, при которой коэффициент усиления транзистора по току уменьшается на 3 дБ.

Часто используют другое значение предельной частоты - f_T . Эта частота, при которой коэффициент усиления по току β_f принимает значение, равное 1. Тогда при $\beta \gg 1$

$$f_T = \beta \cdot f_\beta, \quad (2.2)$$

т.е. частота f_T является произведением коэффициента усиления на ширину полосы.

Рассмотрим эквивалентную схему транзистора в схеме с общим эмиттером (рис. 2.1).



$r_{B'Э}$ - сопротивление перехода база-эмиттер; $r_{B'Б}$ - объемное сопротивление базы; $r_{B'К}$ - сопротивление перехода база-коллектор; $r_{К'Э}$ - сопротивление коллектор-эмиттер; S - крутизна.

Рисунок 2.1 – Эквивалентная схема транзистора в схеме с общим эмиттером

Из рассмотрения этой схемы видно, что частотная зависимость коэффициента усиления по току определяется в основном диффузионной емкостью C_D открытого перехода база-эмиттер. Емкостью перехода коллектор-база C'_{KB} в первом приближении можно пренебречь. Зависимость между C_D и f_T определяется следующим соотношением:

$$C_D = \frac{I_K}{2 \cdot \pi \cdot f_T \cdot U_T} = \frac{S}{2 \cdot \pi \cdot f_T} = \frac{\beta}{2 \cdot \pi \cdot f_T \cdot r_{BЭ}} \quad (2.3)$$

2.2 Зависимость частотных свойств транзистора от режима работы

В первом приближении частота f_T не зависит от среднего значения коллекторного тока. Поэтому из соотношения (2.3) следует, что емкость C_D пропорциональна I_K .

Если на транзистор в схеме с общим эмиттером подать сигнал с высокоомного источника напряжения при заданном базовом токе I_B , то граничная частота транзистора в этом включении будет определяться фильтром нижних частот $r_{BЭ}$, C_D :

$$I_K = S \cdot U_{BЭ} = S \cdot \frac{r_{BЭ}}{1 + j \cdot \omega \cdot r_{BЭ} \cdot C_D} \cdot I_B = \frac{\beta}{1 + j \left(\frac{f}{f_\beta} \right)} \cdot I_B \quad (2.4)$$

Она равна f_β и, следовательно, f_T / β , как следует из определения.

Если выходной сигнал в схеме с общим эмиттером задается источником напряжения с низким выходным сопротивлением, граничная частота схемы (а также граничная частота кривизны) определяется постоянной времени:

$$\tau = (\tau_{BБ} \parallel \tau_{BЭ}) \cdot C_D \approx r_{BБ} \cdot C_D$$

отсюда следует, что частотная характеристика кривизны имеет вид

$$S_f = \frac{I_K}{U_{BЭ}} = \frac{S}{1 + j \cdot \omega \cdot r_{BБ} \cdot C_D} = \frac{S}{1 + j \left(\frac{f}{f_s} \right)} \quad (2.5)$$

здесь S – значение крутизны для низкочастотных входных сигналов и

$f_s = 1 / (2 \cdot \pi \cdot r_{BБ} \cdot C_D)$ – граничная частота крутизны транзистора. Эта частота в

$r_{BЭ} / r_{BБ} \approx 10$ раз больше граничной частоты f_β .

Если на транзистор, включенный по схеме с общей базой, подать сигнал от источника напряжения, то получим тот же результат, что и ранее, поскольку входной сигнал подан на те же выводы.

Иначе обстоит дело, если задан эмиттерный ток транзистора. Поскольку коллекторный ток практически равен эмиттерному, при $|\beta_f| \gg 1$

будет наблюдаться снижение коэффициента усиления вблизи граничной частоты пропускания. Взаимосвязь коллекторного и эмиттерного токов $I_{\text{Э}} = I_{\text{К}} + I_{\text{Б}}$ и $I_{\text{К}} = \beta \cdot I_{\text{Б}}$ приводит к следующему выражению для коэффициента α :

$$\alpha = \frac{I_{\text{К}}}{I_{\text{Э}}} = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

С учетом формулы (2.1) получим

$$\alpha_f = \frac{\beta_f}{1 + \beta_f} = \frac{\alpha}{1 + j\left(\frac{\alpha \cdot f}{\beta \cdot f_{\beta}}\right)}$$

Используя это соотношение, запишем выражение для граничной частоты f_{α} :

$$f_{\alpha} = \frac{\beta \cdot f_{\beta}}{\alpha} \approx f_T.$$

При работе транзистора в режиме эмиттерного повторителя граничная частота коэффициента усиления по напряжению в зависимости от величины нагрузочного сопротивления будет располагаться в диапазоне между f_s и f_T .

Обобщая изложенное выше, запишем следующее соотношение для граничных частот транзистора:

$$f_{\beta} \ll f_s \ll f_{\alpha} \approx f_T$$

2.3 Методы измерения частотных свойств биполярных транзисторов

Наиболее простой метод измерения граничной частоты передачи тока в схеме с ОБ основан на принципе измерения $|\alpha|$ на высокой частоте в схеме с питанием эмиттера от высокочастотного генератора тока (рис.2.2).

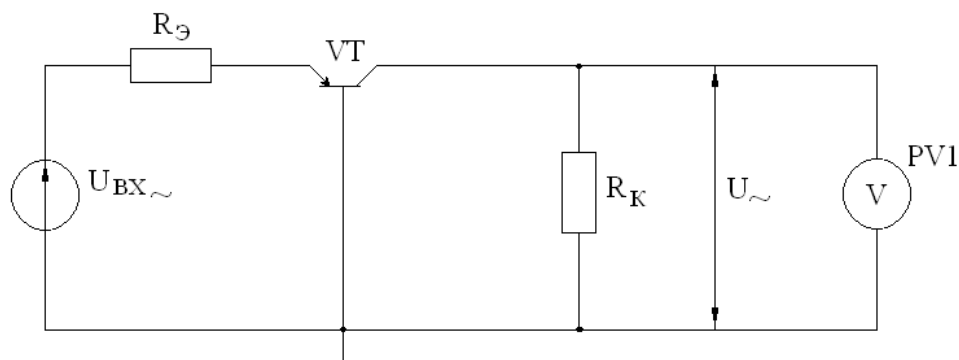


Рисунок 2.2 – Принцип измерения $|\alpha|$ в диапазоне частот при питании эмиттера от генератора тока

При соблюдении условий $R_{\text{Э}} \gg |Z_{\text{ВХ}}|$ и $R_{\text{К}} \ll |Z_{\text{ВЫХ}}|$, где $Z_{\text{ВХ}}$ и $Z_{\text{ВЫХ}}$ - входное и выходное сопротивления транзистора на частоте измерения, для переменных составляющих, справедливо соотношение:

$$U = I_{\text{К}} \cdot R_{\text{К}} = \alpha \cdot I_{\text{Э}} \cdot R_{\text{К}} = \alpha \cdot \frac{R_{\text{К}}}{R_{\text{Э}}} \cdot U_{\text{ВХ}}$$

Т.е. при постоянных величинах $R_{\text{Э}}$, $R_{\text{К}}$ и $U_{\text{ВХ}}$ отсчетный прибор (высокочастотный милливольтметр) может быть проградуирован непосредственно в значениях $|\alpha|$.

Разновидностью данного метода является случай, когда измеряется переменная составляющая тока базы при короткозамкнутой коллекторной цепи и фиксированном токе эмиттера (рис.2.3).

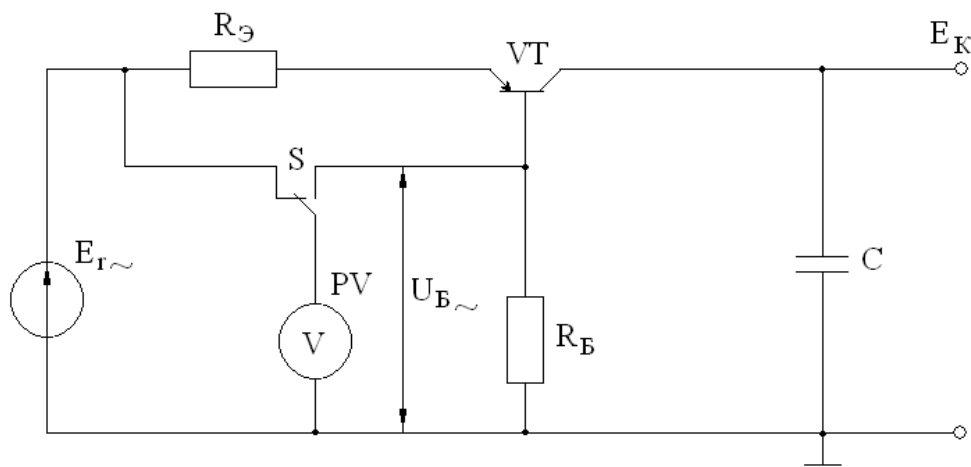


Рисунок 2.3 – Принцип измерения $|\alpha|$ при коротком замыкании цепи коллектора по ВЧ

В данном случае, если $R_{\text{Э}} \gg |Z_{\text{ВХ}}|$, $R_{\text{Б}} \ll R_{\text{Э}}$, справедливы соотношения:

$$I_{\text{Э}\approx} = \frac{E_{r\approx}}{R_{\text{Э}}}; \quad I_{\text{Б}\approx} = \frac{U_{\text{Б}\approx}}{R_{\text{Б}}}; \quad I_{\text{К}\approx} = I_{\text{Э}\approx} - I_{\text{Б}\approx};$$

$$|\alpha| = \frac{I_{\text{К}\approx}}{I_{\text{Э}\approx}} = 1 - \frac{U_{\text{Б}\approx}}{E_{r\approx}} \cdot \frac{R_{\text{Э}}}{R_{\text{Б}}} \quad (2.6)$$

Измерение частотных свойств транзистора в схеме с ОЭ на частотах до 10 МГц так же проводят в режиме с коротким замыканием в цепи коллектора (рис.2.4).

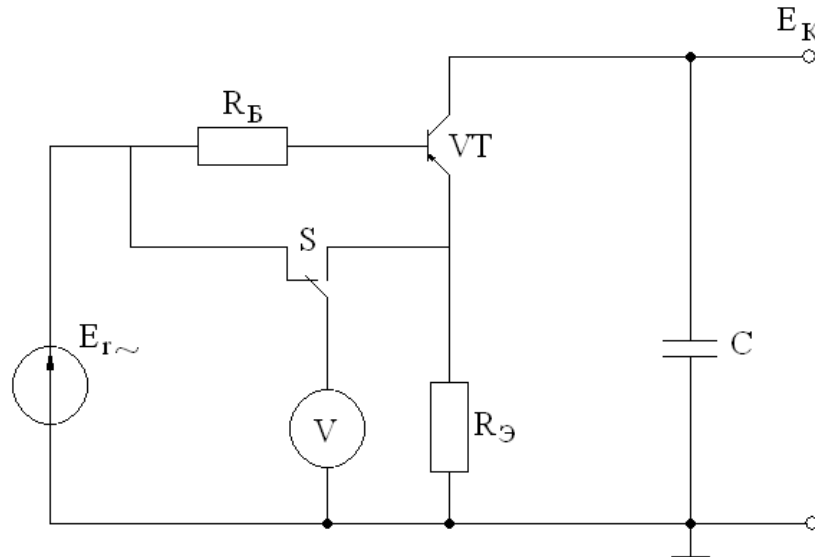


Рисунок 2.4 – Схема измерения $|\beta|$ в схеме с ОЭ на частотах до 10 МГц

При выполнении условий $R_B \gg |Z_{BX}|$, $R_э \ll |Z_{B\bar{B}X}|$ справедливы следующие соотношения:

$$I_B = \frac{E_{r\approx}}{R_B}; \quad I_{э\approx} = \frac{U_{э\approx}}{R_э}; \quad I_{K\approx} = I_{э\approx} - I_{B\approx};$$

$$|\beta| = \frac{I_{K\approx}}{I_{B\approx}} = \frac{I_{э\approx}}{I_{B\approx}} - 1 = \frac{R_B}{R_э} \frac{U_{э\approx}}{E_{r\approx}} - 1 \quad (2.7)$$

2.4 Контрольные вопросы

- 2.4.1. Что такое биполярный транзистор?
- 2.4.2. Области применения биполярных транзисторов?
- 2.4.3. Основные параметры транзистора.
- 2.4.4. Как зависит коэффициент передачи тока и входное сопротивление транзистора от частоты входного сигнала?
- 2.4.5. Объяснить по эквивалентной схеме транзистора причины частотной зависимости параметров транзистора.
- 2.4.6. Что такое частотные параметры?
- 2.4.7. Зависят ли частотные параметры от режима работы транзистора по постоянному току?
- 2.4.8. Как осуществляется измерение $|\beta|$ на частотах до 10 МГц?
- 2.4.9. Как осуществляется измерение $|\alpha|$ на низких и средних частотах?

3 Экспериментальная часть

3.1 Задание

3.1.1. Ознакомиться со справочными данными предложенного для исследования транзистора.

3.1.2. Ознакомиться с функциональными схемами для измерения частотных зависимостей коэффициента передачи тока в схемах с ОЭ и ОБ для диапазона низких и средних частот. Ознакомиться с методическими указаниями по выполнению указаний (п. 3.3).

3.1.3. Для схемы с ОЭ снять зависимости $|\beta|$ от частоты при номинальном режиме по постоянному току ($U_K = 5 \text{ В}$, $I_K = 5 \text{ мА}$). Построить полученную зависимость и определить по ней f_β .

3.1.4. Для схемы с ОБ снять зависимости $|\alpha|$ от частоты при номинальном режиме. Построить полученную зависимость и определить по ней f_α .

3.1.5. Для схемы с ОБ снять зависимость $|\alpha|$ от частоты в следующих рамках:

- 1) $U_K = 5 \text{ В}$; $I_K = 3 \text{ мА}$;
- 2) $U_K = 5 \text{ В}$; $I_K = 10 \text{ мА}$;
- 3) $U_K = 5 \text{ В}$; $I_K = 14 \text{ мА}$;
- 4) $U_K = 5 \text{ В}$; $I_K = 5 \text{ мА}$;
- 5) $U_K = 5 \text{ В}$; $I_K = 5 \text{ мА}$;
- 6) $U_K = 5 \text{ В}$; $I_K = 5 \text{ мА}$.

Частоту входного сигнала изменять в пределах (0,5 – 1,5) от f_α , полученного в п. 3.1.4.

3.1.6. Построить зависимости $|\alpha|$ от частоты для различных режимов работы транзистора. Определить по ним значения f_α для каждого случая. Построить зависимости f_α от тока эмиттера и напряжения на коллекторе.

3.2 Оборудование

Для исследования частотных зависимостей $|\beta|$ и $|\alpha|$ р-п-р транзисторов на частотах до 50 МГц используется измерительный стенд, функциональная схема которого приведена на рис. 3.1.

Питание исследуемого транзистора VT по постоянному току осуществляется от трех регулируемых источников:

- напряжения коллектора E_K от 0 до минус 18 В;
- тока базы 0,01-1,00 мА;

В схеме с ОЭ:

$$|\beta| = U_{\text{э}\approx} - 1, \quad (3.1)$$

где $U_{\text{э}\approx}$ - измеренное значение напряжения на $R_{\text{э}}$, мВ.

В схеме с ОБ:

$$|\alpha| = 1 - 0.01U_{\text{б}\approx}, \quad (3.2)$$

где $U_{\text{б}\approx}$ - измеренное значение напряжения на $R_{\text{б}}$, мВ.

В том случае, если величина $E_{r\approx}$ установлена отличной от 1 В, необходимо определять $|\alpha|$ и $|\beta|$ по формулам (2.6) и (2.7) соответственно.

3.3 Методические указания к выполнению лабораторной работы

3.3.1. Перед началом работы необходимо ознакомиться с функциональной схемой стенда (см. рис. 3.1) и эквивалентными схемами для измерения $|\alpha|$ и $|\beta|$ (см. рис. 2.3 и 2.4).

3.3.2. В работе используется серийные измерительные приборы: генератор высокочастотных сигналов, осциллограф С1-65А, высокочастотный милливольтметр ВЗ-56. Перед началом работы необходимо ознакомиться с правилами работы с этими приборами и установить органы управления в исходные положения.

3.3.3. порядок работы при измерении частотной зависимости $|\beta|$:

- 1) установить переключатель ОЭ-ОБ на измерительном стенде в положение ОЭ;
- 2) ручками $I_{\text{э}}$, $U_{\text{к}}$ установить режим транзистора по постоянному току. В любом случае должно быть $U_{\text{к}} > 2 \text{ В}$, $I_{\text{э}} > 2 \text{ мА}$;
- 3) органами управления генератора установить заданную частоту входного сигнала и амплитуду $E_{r\approx} = 1 \text{ В}$ (10 мВ – по милливольтметру ВЗ-56 в положении $U_{\text{вх}}$ переключателя S2);
- 4) измерить напряжение $U_{\text{э}\approx}$, мВ;
- 5) определить $|\beta|$ по формуле (2.7) или (3.1) (в зависимости от величины $E_{r\approx}$);
- 6) повторить пункты 2) – 5) для другого значения рабочей частоты.

3.3.4. Порядок работы при измерении частотной зависимости $|\alpha|$:

- 1) переключатель ОЭ-ОБ установить в положение ОБ;
- 2) установить режим транзистора по постоянному току;
- 3) установить заданную частоту и амплитуду напряжения высокочастотного генератора;
- 4) измерить напряжение $U_{\text{б}\approx}$, мВ;
- 5) определить $|\alpha|$ по формуле (2.6) или (3.2) (в зависимости от величины $E_{r\approx}$);

б) повторить измерения по пунктам 2) – 5) для нового значения частоты сигнала.

3.3.5. при измерении частотных свойств транзисторов частоту генератора изменить от 100 кГц до уменьшения $|\alpha|$ и $|\beta|$ в 2-3 раза.

3.3.6. при измерении зависимости частотных свойств от режима работы по постоянному току напряжение коллектора должно быть в диапазоне 2-15 В, а ток коллектора 2-14 мА.

3.3.7. Для контроля работы транзистора в активном режиме необходимо следить за формой измеряемого сигнала с помощью осциллографа (форма напряжения должна быть близка к синусоидальной, иначе необходимо уменьшить напряжение генератора в 2-3 раза, обратить внимание на п. 3.2 и пользоваться формулами (2.6) и (2.7) для определения $|\beta|$ и $|\alpha|$).

3.4 Требования к отчету

3.4.1. При составлении отчета необходимо руководствоваться общими требованиями и правилами оформления отчета о лабораторной работе, изложенным в /4/.

3.4.2. Отчет должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) введение;
- 3) паспортные данные исследуемого транзистора;
- 4) функциональные схемы измерения частотных зависимостей $|\alpha|$ и $|\beta|$, справочные данные исследуемых транзисторов;
- 5) таблицы с экспериментальными данными;
- 6) графические зависимости;
- 7) сравнительную оценку полученных результатов;
- 8) выводы.

Рекомендуемая литература

1. Микросхемотехника и наноэлектроника / А.Н. Игнатов. – СПб, 2011. – 528 с. ISBN 978-5-8114-1161-0

http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=2035

2. Электротехника и электроника / Ермуратский П.В., Лычкина Г.П., Минкин Ю.Б. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 417 с ISBN 978-5-94074-688-1

http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=908

3. Твердотельные приборы и устройства: учебное пособие / А.С. Шангин – Томск: ТУСУР, 2012. – 156 с. <http://edu.tusur.ru/training/publications/>

4. Полупроводниковые приборы : учебное пособие / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. - 8-е изд., испр. - СПб. : Лань, 2006. - 478[2] с. :

ил. - (Учебники для вузов. Специальная литература). - Предм. указ.: с. 468-474. - ISBN 5-8114-0368-2

5. Основы микроэлектроники : Учебное пособие для вузов / И. П. Степаненко. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Лаборатория Базовых Знаний, 2004. - 488 с. : ил. - (Технический университет). - Библиогр.: с. 419. - Предм. указ.: с. 488. - ISBN 5-93208-045-0

Учебное пособие

Арестов С.И., Шангин А.С.

Исследование частотных свойств биполярного транзистора

Методические указания к лабораторной работе

Усл. печ. л. _____ Препринт
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40