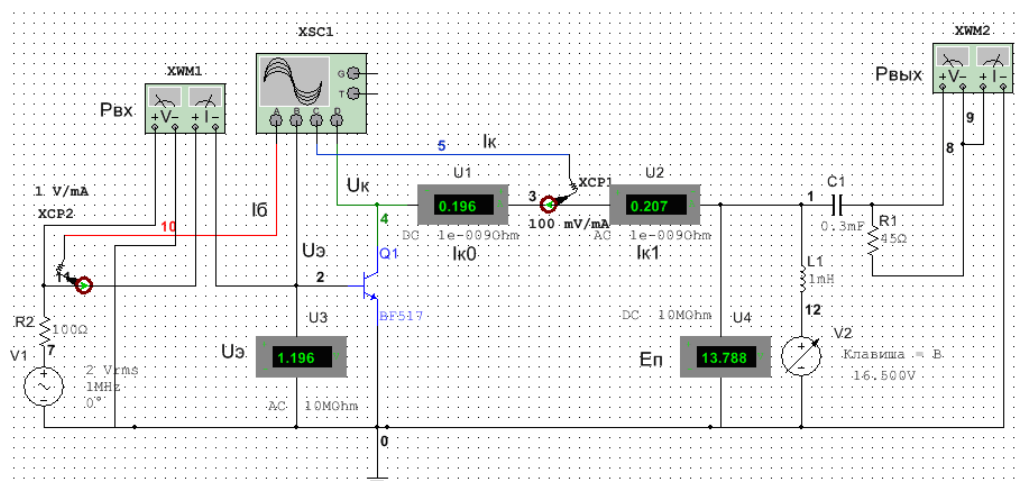


Ф. В. Голик

# ГЕНЕРИРОВАНИЕ И ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРНЫХ ГВВ В СРЕДЕ NI MULTISIM 12

### ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ЧАСТЬ 1



Великий Новгород  
2014

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФГБОУ ВПО  
Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

---

**Ф. В. Голик**

**ГЕНЕРИРОВАНИЕ И  
ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРНЫХ ГВВ  
В СРЕДЕ NI MULTISIM 12**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
ЧАСТЬ 1**

Великий Новгород  
2014

**УДК 621.396.61 (075)**

**ББК 32.848я73**

*Рецензент*

Доктор технических наук, профессор **Л. А. Рассветалов**

Голик Ф. В. Генерирование и формирование сигналов. Лабораторный практикум. Часть 1. Версия 1. [Электронный ресурс]:/Ф. В. Голик. – Электрон. дан. (2 МБ). НовГУ им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2013. – 83 с. – Систем. требования: Intel Pentium (или аналогичный процессор других производителей) 1 ГГц; 512 МБ оперативной памяти; 3 МБ свободного дискового пространства; привод DVD; операционная система Microsoft Windows 2000 SP 4 / XP SP 2 / Vista (32 бит); Adobe Reader 7.0 (или аналогичный продукт для чтения файлов формата pdf).

Лабораторный практикум включает в себя описание четырех лабораторных работ, посвященных исследованию транзисторных генераторов с внешним возбуждением (ГВВ), и содержит в каждой работе краткую теоретическую часть, подробное изложение порядка проведения исследований, а также контрольные вопросы.

Лабораторные работы выполняются путем моделирования схем ГВВ в среде компьютерного моделирования NI Multisim 12.

Содержание пособия отвечает образовательным стандартам и предназначено для подготовки бакалавров по направлению 11.03.01 – «Радиотехника» по профилю «Радиотехнические средства передачи, приема и обработки сигналов».

**УДК621.396.61 (075)**

**ББК 32. 848я73**

© ФГБОУ ВПО НовГУ им. Ярослава Мудрого, 2014

© Голик Ф. В., 2014

## Введение

Настоящее пособие содержит описание лабораторных работ по учебной дисциплине «Генерирование и формирование сигналов» для студентов специальности 11.03.01 «Радиотехника».

Работы выполняются на компьютере, в среде компьютерного моделирования NI Multisim 12 (MS12). Multisim – это простой в использовании современный инструмент конструирования электронных приборов. Он состоит из набора взаимосвязанных модулей, предназначенных для составления, анализа и настройки аналоговых, цифровых, радиочастотных и гибридных схем.

При помощи программной среды MS12 можно спроектировать и проверить принципиальные схемы электронных устройств, обнаружить в них ошибки ещё до создания экспериментальных образцов, а также интерактивно исследовать созданные схемы с помощью средств анализа и виртуальных приборов.

Особенностью среды MS12 является наличие контрольно-измерительных приборов, по внешнему виду и характеристикам приближенных к их промышленным аналогам, а также наличие в её библиотеках более 16000 электронных компонентов и узлов, что позволяет создавать не только простые, но и сложные схемы электронных устройств.

MS12 интуитивно прост и нагляден, что делает его незаменимым при использовании в учебном процессе.

## Порядок проведения лабораторных работ

Каждое лабораторное занятие должно включать в себя следующие этапы:

1 Подготовка к работе (проводится студентом до начала лабораторного занятия).

1.1 Изучение теоретических сведений.

1.2 Ознакомление с содержанием и порядком выполнения лабораторной работы.

2 Допуск к лабораторной работе.

Проводится преподавателем после личной беседы с каждым студентом. Вопросы, знание которых необходимо для выполнения работ, приведены в конце каждой лабораторной работы.

Если в результате опроса выяснится неподготовленность студента по теме, он не допускается к работе и направляется на доработку материала. До окончания занятий студент должен находиться в лаборатории.

3 Выполнение лабораторной работы.

После допуска студенты приступают к выполнению лабораторной работы в соответствии с данными методическими указаниями. При выполнении работы необходимо

обязательно соблюдать правила техники безопасности, с которыми должен ознакомиться каждый студент. По окончании выполнения работы студент должен сообщить об этом преподавателю, после чего приступить к обработке результатов и составлению отчета.

#### 4 Оформление отчета и защита.

Отчет оформляется индивидуально каждым студентом. Он должен содержать:

##### 4.1 Цель работы.

##### 4.2 Задание на выполнение.

##### 4.3 Чертежи всех использованных схем (каждая схема должна иметь название).

##### 4.4 Расчетные формулы и результаты измерений.

4.5 Отчет по лабораторной работе оформляется в текстовом редакторе Word. К отчету прилагается файл Excel с таблицами экспериментальных данных и построенными по этим данным графиками. в котором

4.6 Анализ результатов и полученных экспериментально зависимостей. Работа считается выполненной при наличии в отчете всех результатов измерений и необходимых вычислений, а также всех необходимых схем и графиков зависимостей.

По завершении оформления отчета студент должен защитить данную работу.

На защите студент обязан представить преподавателю отчет о проделанной работе.

По отчету проводится обсуждение проделанной работы, по результатам которого преподаватель ставит отметку о зачете работы или отправляет студента на доработку данной темы.

## **Лабораторная работа 1. Исследование статических характеристик биполярного транзистора**

Данная лабораторная работа является первой в цикле работ, в которых исследование каскадов радиопередающих устройств осуществляется путем их моделирования средствами комплекса программ NI Multisim 12. Поэтому в этой работе большое внимание уделено изучению моделирующей программы – выбору компонентов, построению принципиальных схем, использованию виртуальных измерительных приборов и т. п. Это позволит студенту изучить основные возможности комплекса в процессе выполнения лабораторной работы.

#### **Цель работы**

- ознакомление с программным комплексом NI Multisim 12 и приобретение навыков работы на нем;
- изучение методов анализа статических характеристик транзисторов;
- расчет параметров транзисторов по статическим характеристикам.

## Содержание работы

- создание виртуальной схемы измерения параметров транзистора;
- снятие входных и проходных статических характеристик транзистора;
- снятие выходных характеристик транзистора;
- расчет параметров транзистора по статическим характеристикам.

## 1.1 Теоретические сведения

### 1.1.1 Статические характеристики транзистора при включении по схеме с общим эмиттером

В зависимости от того, какой вывод транзистора подключен одновременно к входу и выходу схемы, различают три схемы включения транзистора — с общим эмиттером (ОЭ), общей базой (ОБ) и общим коллектором (ОК). Наиболее широкое применение нашла схема с общим эмиттером (рис. 1.1).

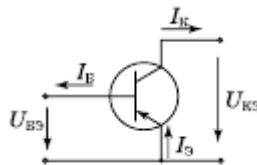


Рис. 1.1 Включение транзистора по схеме с общим эмиттером

Работа транзистора характеризуется семействами входных и выходных характеристик (рис. 1.2). Эти характеристики (для по схеме с ОЭ) приводятся в справочниках по транзисторам (например [3]).

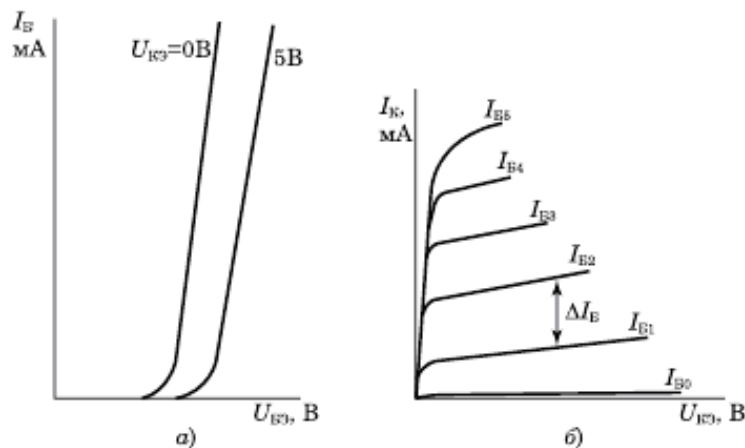


Рис. 1.2. Характеристики транзистора а— входные, б— выходные

**Входные характеристики** (рис. 1.2,а) показывают зависимость тока базы ( $I_B$ ) от напряжения между базой и эмиттером ( $U_{BЭ}$ ), при постоянном напряжении, приложенному к коллектору ( $U_{КЭ}$ ).

**Выходные характеристики** (рис. 1.2,б) показывают зависимость тока коллектора ( $I_K$ ) от напряжения между коллектором и эмиттером ( $U_{КЭ}$ ), при постоянном значении тока

базы ( $I_B$ ). Выходные характеристики приводятся для достаточно большого (5 и более) значений тока базы ( $I_{B1}$ ,  $I_{B2}$ ,  $I_{B3}$ , и т. д.), различающихся на фиксированное значение  $\Delta I_B$ .

**Проходные характеристики** (рис. 1.3) – зависимость тока коллектора ( $I_K$ ) от напряжения база-эмиттер ( $U_{БЭ}$ ) при постоянном напряжении коллектор-эмиттер ( $U_{КЭ}$ ). Семейство этих характеристик используется при расчете усилителя в режиме с отсечкой коллекторного тока.

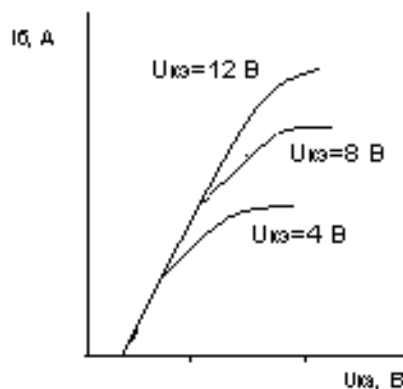


Рис. 1.3 Проходные характеристики биполярного транзистора

### 1.1.2 Схема замещения биполярного транзистора. Транзистор как четырёхполюсник

Транзистор является весьма сложным прибором и не может быть полностью описан одной - двумя величинами (как, например, резистор или конденсатор). Характеризующие его зависимости (например, приведённые на рис. 1.2) имеют сложный и нелинейный характер, поэтому для транзистора применяют различные схемы замещения — математические модели, характеризующие некоторые его свойства с заданной точностью и в определённых пределах.

В программном комплексе NI Multisim 12 используется модифицированная модель Гуммеля-Пуна, которая содержит 66 [параметров](#). При практических расчетах каскадов радиопередающих устройств ограничиваются значительно меньшим числом параметров, часть которых можно рассчитать по статическим характеристикам транзистора.

При анализе работы усилительного каскада в малосигнальном (линейном) режиме, представляют транзистор в виде активного линейного четырёхполюсника, который характеризуется входными ( $U_1$ ,  $I_1$ ) и выходными ( $U_2$ ,  $I_2$ ) токами и напряжениями.

Для их расчёта используется система линейных уравнений, в которых два тока или напряжения являются известными, а два других — неизвестными. Известные и неизвестные величины связываются коэффициентами, которые называются параметрами четырёхполюсника. Для расчёта усилителей применяются  $z$  (имеют размерность сопротивления),  $y$  (размерность проводимости) и  $h$  (смешанная размерность) параметры. При расчёте усили-

телей с общим эмиттером наибольшее распространение получили  $h$ -параметры, связывающие токи и напряжения с помощью следующей системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2 \\ I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2 \end{cases}$$

В соответствии с рисунком 1.4 и учитывая, что для усилителя входными и выходными сигналами являются приращения соответствующих токов и напряжений, запишем эту систему уравнений в следующем виде:

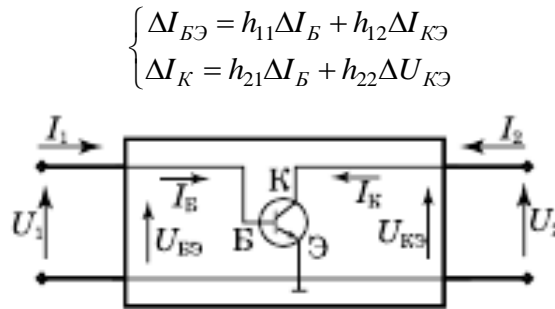


Рис. 1.4. Представление транзистора, включённого по схеме с ОЭ, в виде четырехполюсника

Приравняв к нулю  $\Delta I_Б$  (режим холостого хода на входе) и  $\Delta U_{КЭ}$  (режим короткого замыкания на выходе) мы сможем рассчитать  $h$ -параметры:

$$\begin{aligned} h_{11} &= \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_Б} \right|_{\Delta U_{КЭ} = 0}, & h_{12} &= \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{\Delta I_Б = 0}, \\ h_{21} &= \left. \frac{\Delta I_К}{\Delta I_Б} \right|_{\Delta U_{КЭ} = 0}, & h_{22} &= \left. \frac{\Delta I_К}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{\Delta I_Б = 0} \end{aligned}$$

Следует отметить, что если изменение величины равно нулю, то эта величина не изменяется т. е.  $h_{12}$  и  $h_{22}$  рассчитываются при постоянном значении тока базы ( $I_Б = \text{const}$ ) а  $h_{11}$  и  $h_{21}$  при постоянном значении напряжения на коллекторе ( $U_{КЭ} = \text{const}$ ). Физический смысл  $h$ -параметров следующий:

$$\begin{aligned} h_{11} &= \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_Б} \right|_{U_{КЭ} = \text{const}} && \text{- входное сопротивление при коротком замыкании на выходе;} \\ h_{12} &= \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_Б = \text{const}} && \text{- коэффициент обратной связи по напряжению;} \\ h_{21} &= \left. \frac{\Delta I_К}{\Delta I_Б} \right|_{U_{КЭ} = \text{const}} && \text{- коэффициент передачи тока при коротком замыкании на выходе;} \\ h_{22} &= \left. \frac{\Delta I_К}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_Б = \text{const}} && \text{- выходная проводимость при холостом ходе на входе} \end{aligned}$$

Кроме  $h$ -параметров для анализа работы транзисторов применяются коэффициенты передачи тока эмиттера ( $\alpha = \Delta I_К / \Delta I_Э$ ) и тока базы ( $\beta = \Delta I_К / \Delta I_Б$ ). При ориентировочных расчётах схем с ОЭ, коэффициент  $\beta$  может использоваться как основной параметр, харак-



теризующих транзистор. В этом случае используется схема замещения, приведённая на рисунке 1.5.

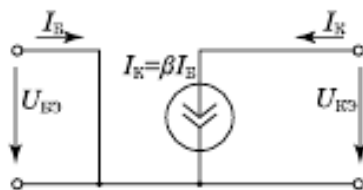


Рис. 1.5. Схема замещения транзистора на базе коэффициента  $\beta$

### 1.1.3 Расчёт $h$ – параметров

В лабораторной работе  $h$ –параметры рассчитываются графоаналитическим методом на основании входных ( $h_{11}$ ,  $h_{12}$ ) и выходных ( $h_{21}$ ,  $h_{22}$ ) характеристик транзистора.

При расчёте  $h$ –параметров необходимо обратить внимание на то, что каждой точке характеристики соответствуют три величины:

- для входной характеристики—  $I_B$ ,  $U_{БЭ}$  и  $U_{КЭ}$ ;
- для выходной характеристики –  $I_K$ ,  $U_{КЭ}$ ,  $I_B$ .

Третий параметр отсутствует на осях графика и является постоянной величиной, при которой строится соответствующая характеристика.

#### 1.1.3.1 Расчёт по входным характеристикам транзистора

Расчет параметра  $h_{11} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B} \Big|_{U_{КЭ} = const}$  (рис. 1.6, а) производится следующим об-

разом: на одной из имеющихся характеристик, соответствующей выбранному напряжению на коллекторе  $U_{КЭ}=const$ , выбирается линейный или максимально близкий к линейному участок и на нём две точки (точки 1 и 2 на рис. 1.6, а). Разность напряжений базы, соответствующих этим точкам, даст нам  $\Delta U_{БЭ} = U_{БЭ2} - U_{БЭ1}$ , а разность соответствующих значений тока – изменение тока базы  $\Delta I_B = I_{Б2} - I_{Б1}$ .

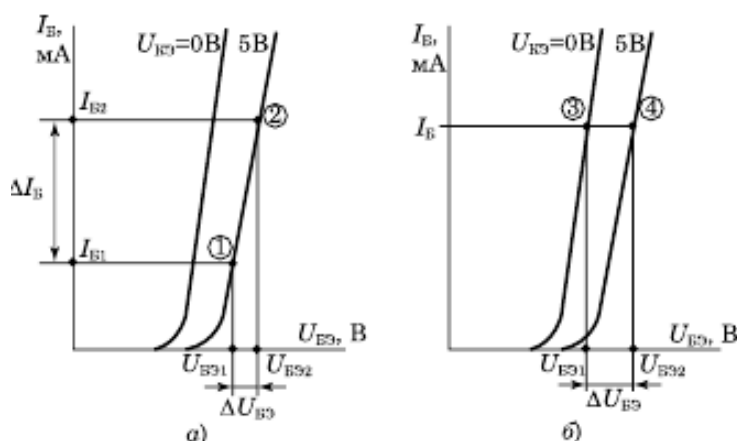


Рис. 1.6. К расчёту  $h$ –параметров транзистора а –  $h_{11}$ , б –  $h_{12}$

При расчете параметра  $h_{12} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_B = const}$  выбирают значение тока базы, для

которого производится расчет (т. е. обеспечивается выполнение условия  $I_B = const$ ). На двух кривых, построенных для разных значений напряжения коллектора, отмечают соответствующие этому току точки (точки 3 и 4 на рис. 1.6, б). Разность напряжений  $U_{БЭ}$ , соответствующих этим точкам, дает изменение напряжения между базой и эмиттером:  $\Delta U_{БЭ} = U_{БЭ4} - U_{БЭ3}$ . Величина  $\Delta U_{КЭ}$  определяется как разность между напряжениями  $U_{КЭ}$ , для которых строились входные характеристик (для характеристик, приведенных на рис. 1.6  $\Delta U_{КЭ} = 5 - 0 = 5$  В).

### 1.1.3.2 Расчёт по выходным характеристикам

Для расчёта параметра  $h_{21} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \right|_{U_{КЭ} = const}$  нужно выбрать значение  $U_{КЭ}$  и на

кривых, соответствующих двум значениям тока базы, различающихся на  $\Delta I_B$ , отметить соответствующие точки (точки 1 и 2 на рис. 1.7, а). Разность значений тока коллектора  $I_K$ , равна приращению тока  $\Delta I_K = I_{K2} - I_{K1}$ . Величина  $\Delta I_B = I_{B2} - I_{B1}$  определяется по характеристикам.

При расчете параметра  $h_{22} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_B = const}$  выбирается одна из имеющихся ха-

рактеристик тока базы  $I_B$  и на ней отмечают две точки (точки 3 и 4 на рис. 1.7, б). Разность напряжений коллектора, соответствующих этим точкам, равна  $\Delta U_{КЭ} = U_{КЭ4} - U_{КЭ3}$ , а разность соответствующих значений ток – изменение тока коллектора  $\Delta I_K = I_{K4} - I_{K3}$ .

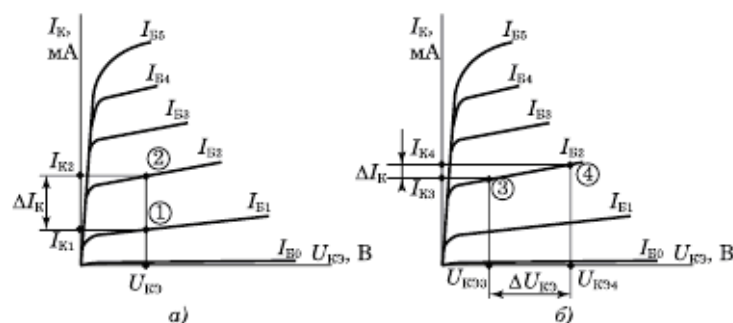


Рис. 1.7. К расчёту  $h$ -параметров транзистора а –  $h_{21}$ , б –  $h_{22}$

### 1.1.4 Расчет параметров транзистора при работе в нелинейном режиме

Усилительные каскады радиопередающих устройств работают в режиме с отсечкой коллекторного тока, т. е. в отдельные моменты времени транзистор заперт. При этом коллекторный ток представляет собой периодическую последовательность импульсов, форма

которых близка к отрезку косинусоиды. Половина ширины основания импульса называется углом отсечки, обозначается символом  $\theta$  и измеряется в радианах или в градусах (рис. 1.8).

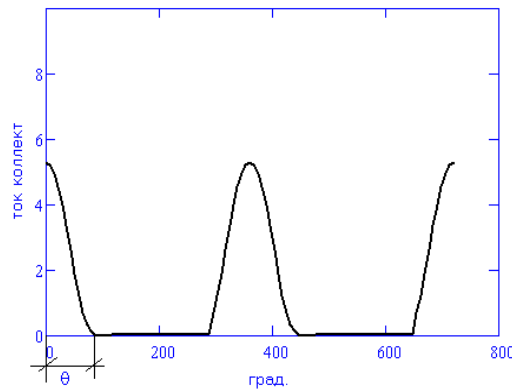


Рис. 1.8. Импульсы коллекторного тока

Работа в режиме с отсечкой позволяет повысить коэффициент полезного действия усилителя. Восстановление синусоидальной формы выходного сигнала осуществляется с помощью включенного в цепь коллектора параллельного колебательного контура (полосового фильтра или фильтра низкой частоты), который отфильтровывает (подавляет) высшие гармоники, сохраняя первую.

При расчете усилителя используют следующие параметры, которые можно найти по статическим характеристикам транзистора:

- $S_B = \operatorname{tg} \alpha_1$  - крутизна входной характеристики (зависимость тока базы от напряжения база-эмиттер) (рис. 1.9, а);
- $S_K = \operatorname{tg} \alpha_2$  - крутизна проходной характеристики (зависимости тока коллектора от напряжения база-эмиттер) (рис. 9, б);
- $S_{cp} = \operatorname{tg} \alpha$  - крутизна линии граничного режима (ЛГР), (рис. 9, в);
- $E_{отс}$  - напряжение отсечки коллекторного тока (рис. 9, б).

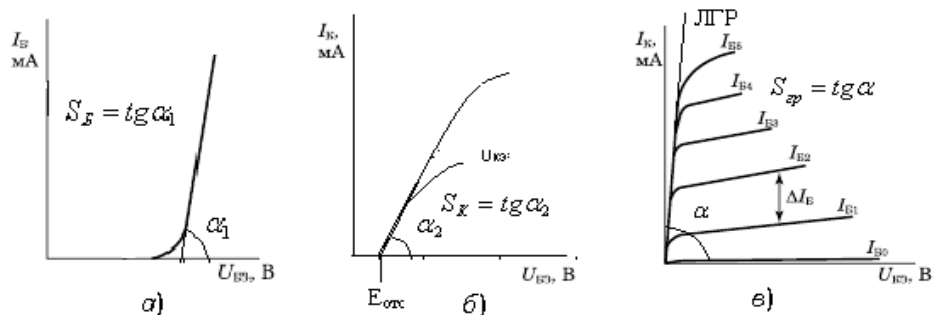


Рис. 1.9.

По параметрам  $S_K$  и  $S_B$  можно найти коэффициент передачи  $\beta_0$  по току постоянно-му току в схеме с ОЭ (параметр  $h_{21}$ ):

$$\beta_0 = \frac{S_K}{S_B}.$$

Кроме того, знание величин крутизны характеристик позволяет оценить сопротивление базы ( $r_B$ ), эмиттера ( $r_E$ ) и коллектора ( $r_K$ ), если они не приведены в справочных данных. Для этого используют соотношения:

$$S_B = \frac{1}{r_B + \beta_0 r_E}, S_K = \frac{\beta_0}{r_B + \beta_0 r_E}, S_{GP} = \frac{1}{r_K + r_E}.$$

Естественно, что приведенных соотношений недостаточно для определения всех перечисленных сопротивлений, но одно из сопротивлений при известных остальных, всегда можно найти.

### 1.1.5 Основные параметры модели Гуммеля-Пуна для биполярного транзистора

Мы уже отмечали, что при моделировании в программном комплексе Multisim 12 учитывается большое количество [параметров](#). Лишь часть этих параметров используется при расчете каскадов транзисторных радиопередающих устройств. В табл. 1 приведена расшифровка основных параметров транзистора. Перечень параметров конкретного транзистора можно увидеть, дважды щелкнув по его иконке и выбрав в окне **Параметры – Редактировать модель**.

Таблица 1

Параметры модифицированной модели Гуммеля-Пуна

Name	Description	Описание параметра	Единица измерения
BF	Ideal maximum forward beta	Максимальный коэффициент передачи тока для схемы с ОЭ $\beta_0$ или $h_{21}$	
RB	Zero-bias base resistance	Сопротивление базы при нулевом смещении $r_b$	$\Omega$
RBM	Minimum base resistance at high currents	Минимальное сопротивление базы при большом токе	$\Omega$
RE	Emitter resistance	Объемное сопротивление эмиттера $r_e$	$\Omega$
RC	Collector resistance	Объемное сопротивление коллектора $r_k$	$\Omega$
CJE	B-E zero-bias depletion capacitance	Ёмкость перехода база-эмиттер при нулевом смещении $C_j$	F
TF	Ideal forward transit time	Идеальное время пролета неосновных носителей через базу $\tau_T$	sec
CJC	B-C zero-bias depletion capacitance	Ёмкость перехода база-коллектор при нулевом смещении $C_{bc}$	F
TR	Ideal reverse transit time	Идеальное время рекомбинации неосновных носителей в базе $\tau_\beta$	sec
CJS	Zero-bias substrate capacitance	Ёмкость перехода коллектор-подложка при нулевом смещении $C_k$	F

## 1.2. Порядок выполнения лабораторной работы

1 Запустите программу NI Multisim 12.

2 Создайте документ «Новая схема». Выполните (Файл – Новый - Создать схему).

3 Выберите и поместите транзистор заданного типа на схеме.

Транзистор выбирается из табл. 2 в соответствии с номером варианта, который равен порядковому номеру Вашей фамилии в списке группы.

Таблица 2

Варианты заданий

Вариант №	Тип транзистора	Вариант №	Тип транзистора
1	BF799W	16	FMMTH10
2	BFG193	17	MMBR571L
3	BFP136W	18	MMBR901_B
4	BFP181	19	MMBR902LT1
5	BFP193	20	MMBR931L
6	BFP280	21	MMBR941
7	BFP450	22	MMBR951L
8	BFQ81	23	MRF5711L
9	BFR106	24	MRF5812
10	BFR181	25	MRF8372
11	BFR193	26	MRF9011L
12	BFR280	27	MRF917T1
13	BFR93A	28	MRF927T1
14	BFS17	29	MRF9411L
15	BFS480	30	MRF947

Для вставки компонента **Транзистор** откройте меню **Вставить – Компонент**. Появится диалоговое окно, в котором выберите раздел **RF**. В нем содержатся компоненты радиотехнических схем.

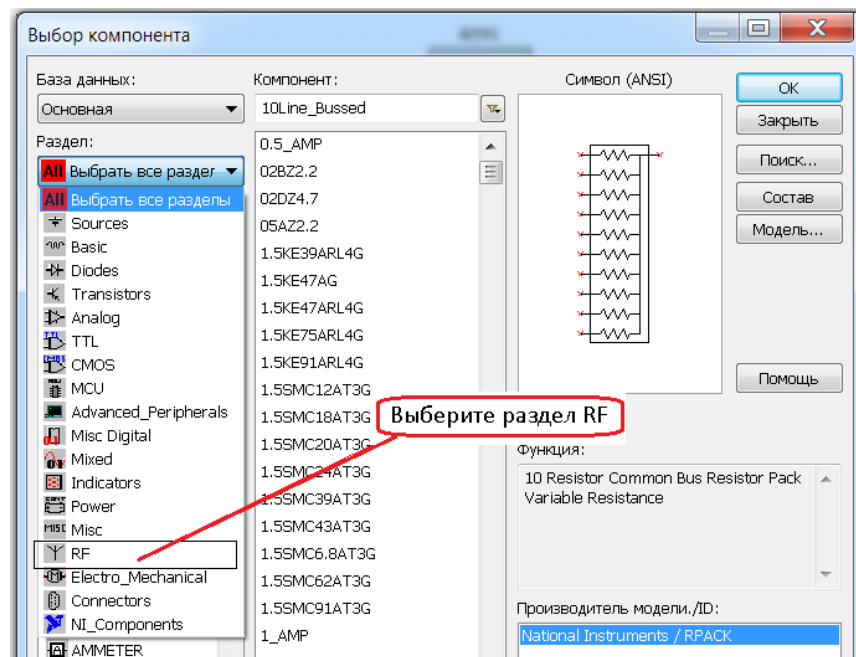


Рис. 1.10

В поле **Компоненты** (рис. 1.11) выберите транзистор в соответствии со своим вариантом и нажмите кнопку **ОК**.

В поле документа появится схематическое изображение транзистора (рис. 1.12).

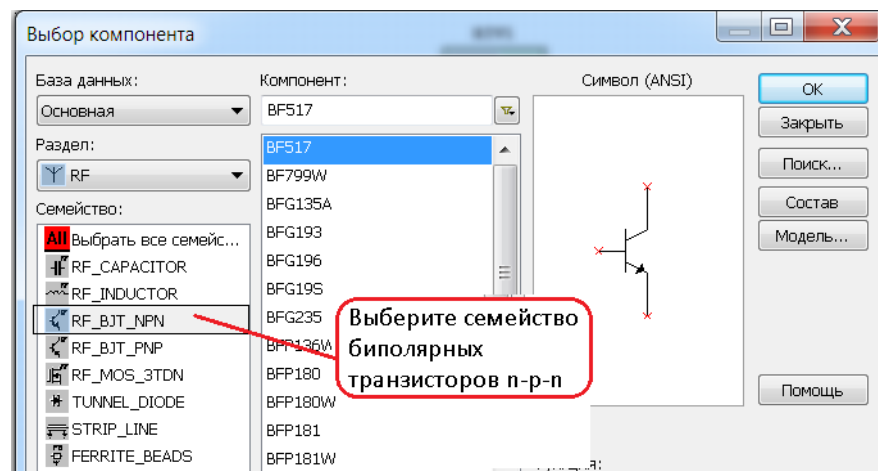


Рис. 1.11

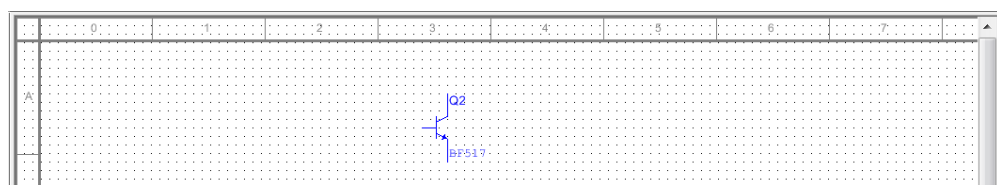


Рис. 1.12

#### 4 Создайте схему измерения параметров транзистора.

Для этого нужно разместить на рабочем листе источники базового и коллекторного напряжения, измерители базового и коллекторного токов (амперметры), и измерители базового и коллекторного напряжения (вольтметры).

Сначала выберите два регулируемых источника напряжения (рис. 1.13).

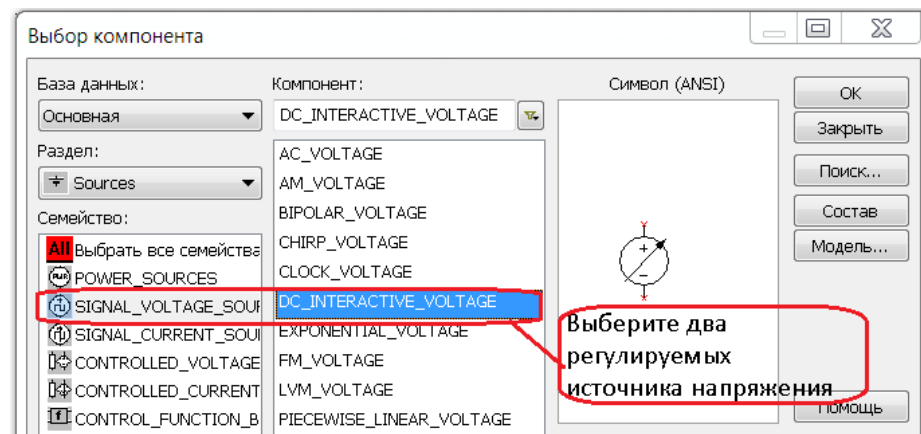
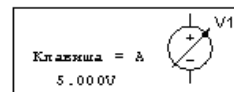


Рис. 1.13



На рабочем поле появится иконка источника

Регулировка напряжения источника осуществляется с помощью клавиши «А», которую можно изменить, дважды щелкнув по изображению источника. Кроме того, в появившемся окне можно установить максимальное напряжение источника и шаг приращения напряжения в процентах от максимального значения.

Задайте максимальное напряжения источника V1 базового напряжения 6 В, а коллекторного V2 20 В, а так же измените имя клавиши управления источником коллекторного напряжения V2 (рис. 1.14). Для источнике V1 задайте шаг 5%, а для V2 – 10%.

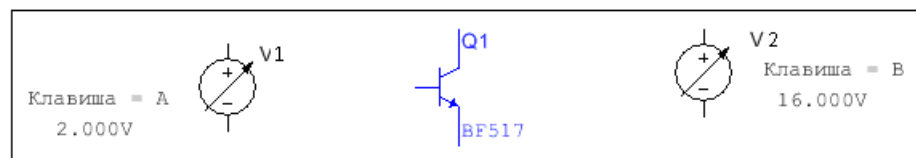


Рис. 1.14

Измерительные приборы можно выбрать на панели инструментов **Виртуальные измерительные компоненты**. Разместите их на рабочем листе (рис. 1.15). Дважды щелкнув по иконке прибора, установите вид измеряемого тока (напряжения) – **DC** – постоянный ток (напряжение).

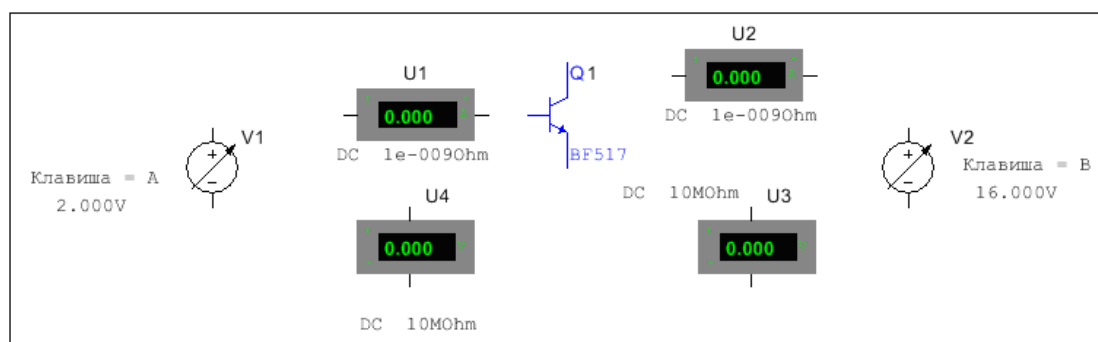


Рис. 1.15

Соедините выводы компонентов в соответствии и приведенной ниже принципиальной схемой (рис. 1.16).

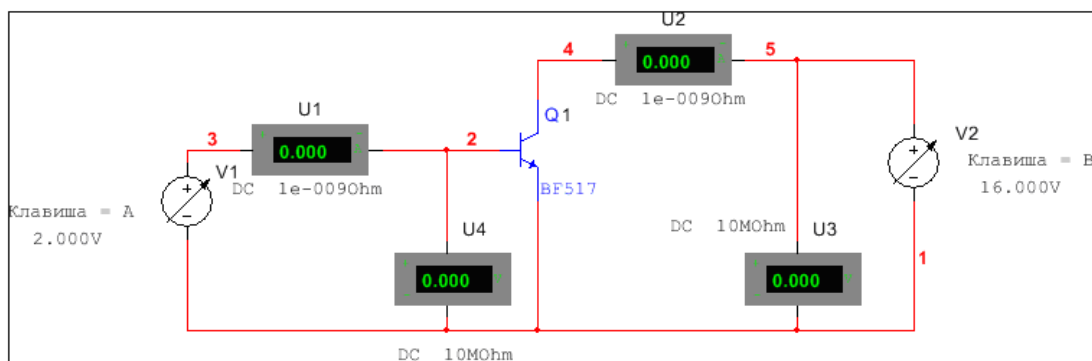


Рис. 1.16

**Примечание.** Перемещать компоненты по полю документа можно, выделив его и захватив мышкой или клавишами клавиатуры (**Стрелки**).

##### 5 Снимите входные и проходные статических характеристик транзистора.

Установите соответствующие напряжения  $E_b$  и  $E_k$ . Запустите процесс моделирования, нажав на кнопку **Пуск** (или клавишу **F5**). Измерьте значения токов. По результатам моделирования заполните табл. 3

Таблица 3

#### Входные и проходные статические характеристики

Еб, В	Ек = 4 В		Ек = 8 В		Ек = 12 В	
	Іб, А	Ік, А	Іб, А	Ік, А	Іб, А	Ік, А
0,8						
1,1						
1,4						
...						
5,0						

**Примечание.** Для удобства последующей обработки данных желательно скопировать табл. 3 на лист Excel и там же заполнить ее экспериментальными данными.

По экспериментальным данным постройте графики статических характеристик в программе Excel.

**Примечание.** Построение графиков и расчеты можно выполнить при оформлении отчета по лабораторной работе.

**Пример.** Сняты статические характеристики транзистора BF 517. Результаты эксперимента приведены в табл. 4.



Таблица 4

Еб, В	Ек = 4 В		Ек = 8 В		Ек = 12 В	
	Іб, А	Ік, А	Іб, А	Ік, А	Іб, А	Ік, А
0,8	0,00009	0,008	0,00009	0,008	0,00009	0,008
1,1	0,011	0,322	0,010	0,327	0,010	0,331
1,4	0,045	0,727	0,043	0,740	0,040	0,751
1,7	0,100	1,098	0,095	1,120	0,090	1,141
2,0	0,242	1,193	0,162	1,464	0,154	1,495
2,3	0,421	1,170	0,240	1,776	0,229	1,817
2,6	0,602	1,144	0,328	2,060	0,314	2,113
2,9	0,783	1,116	0,424	2,322	0,406	2,385
3,2	0,965	1,088	0,578	2,387	0,505	2,638
3,5	1,148	1,060	0,750	2,365	0,609	2,873
3,8	1,331	1,032	0,941	2,340	0,718	3,094
4,1			1,124	2,313	0,831	3,302
4,4			1,307	2,285	0,947	3,498
4,7			1,491	2,258	1,106	3,555
5,0			1,674	2,229	1,287	3,534

По данным этой таблицы в программе Excel построены графики (рис. 1.17 и 1.18).

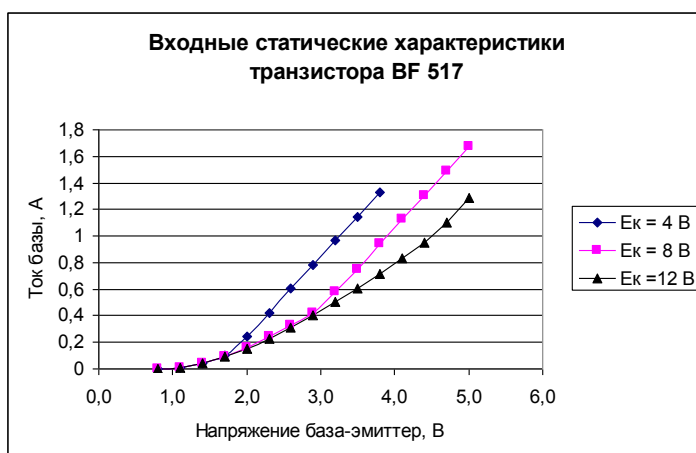


Рис. 1.17

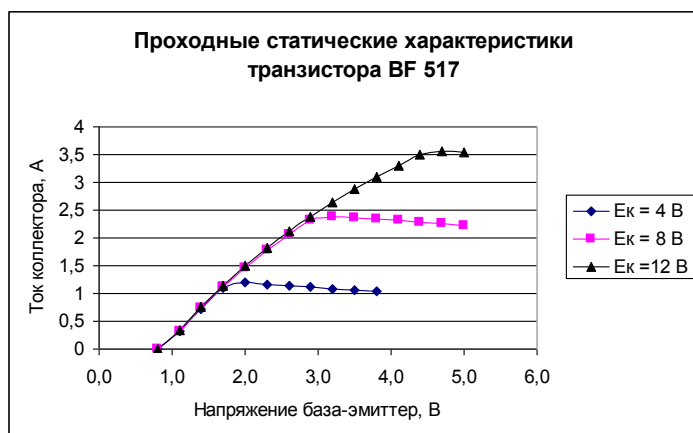


Рис. 1.18

## 6 Рассчитайте $h$ -параметры транзистора по входным статическим характеристикам

Расчет производится по формулам (см. п. 1.3.1):

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_B} \right|_{U_{КЭ} = const}, \quad h_{12} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_B = const}.$$

Приращения токов и напряжений найдете по входным характеристикам исследуемого транзистора.

**Пример.** Для характеристик транзистора BF 517, по графику рис. 1. 19 найдены приращения ток базы и напряжения коллектор-эмиттер  $U_{КЭ}=12$  В.  $\Delta U_{БЭ} \approx 1.2$  В,  $\Delta I_B = 0.4$  А. Тогда  $h_{11} = \frac{1.2}{0.4} = 3$  Ом. Итак, входное сопротивление транзистора BF 517 при коротком замыкании на выходе равно 3 Ом.



Рис. 1.19

Для расчета коэффициента  $h_{12}$  обратной связи по напряжению транзистора BF 517 по входным характеристикам найдем приращение напряжения  $\Delta U_{БЭ} = 1.4$  В при постоянном токе базы  $I_B = 1$  А. В расчете использовались характеристики, снятые при напряжениях коллектор-эмиттер 4 и 12 В. Следовательно,  $\Delta U_{КЭ} = 8$  В и  $h_{12} = \frac{1.4}{8} = 0.175$ .

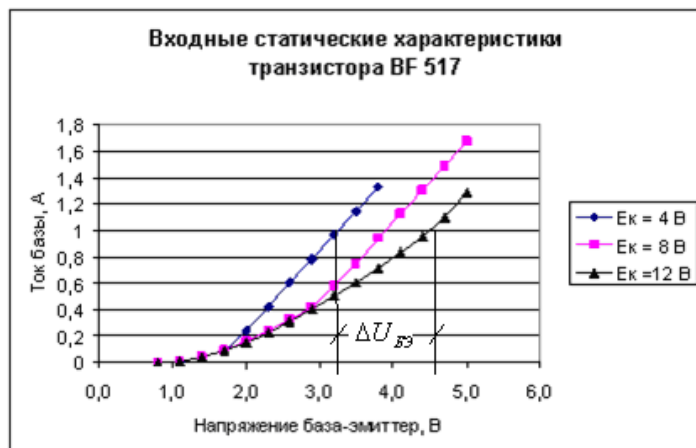


Рис. 1.20

## 7 Рассчитайте крутизну статических характеристик токов базы и коллектора

Расчет производится по формулам (см. п. 1.1.4):

$$S_B = \operatorname{tg} \alpha_1, \quad S_K = \operatorname{tg} \alpha_2.$$

$$S_B = \frac{1}{r_B + \beta_0 r_{\Xi}}, \quad S_K = \frac{\beta_0}{r_B + \beta_0 r_{\Xi}}.$$

**Пример.** Для расчета крутизны тока базы на входных характеристиках (рис. 1.17) транзистора BF 517 построим прямоугольный треугольник, в качестве гипотенузы которого используем отрезок прямой, аппроксимирующей участок характеристики при  $E_K=12$  В (рис. 1.21). По графику найдем длины катетов (отрезков А и В).  $A=0.6$  А,  $B=1.8$  В. Тогда

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{A}{B} = 0.33 \text{ А/В}, \text{ т. е. крутизна характеристики тока базы транзистора BF 517 равна}$$

$$S_B = 0.33 \text{ А/В}.$$



Рис. 1.21

Следует отметить, что входные характеристики располагаются веером и имеют разный угол наклона, зависящий от величины коллекторного напряжения. Следовательно, крутизна характеристик тока базы изменяется при изменении коллекторного напряжения, что характерно для работы транзистора в динамическом режиме.

Аналогично рассчитывается крутизна характеристик тока коллектора (рис. 1.22).

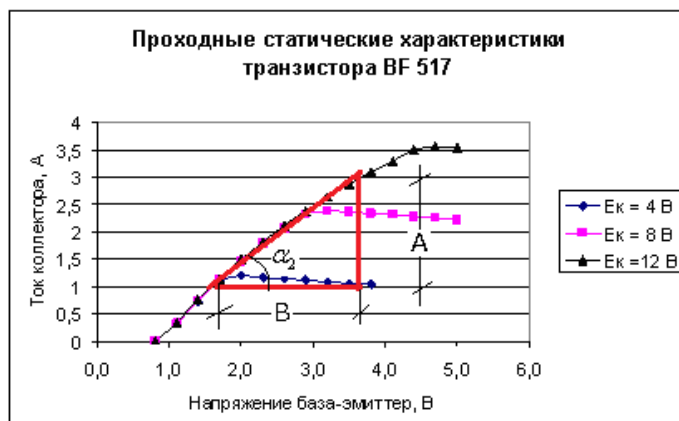


Рис. 1.22

Длины катетов треугольника примерно равны  $A=2$  А,  $B=1$  В. Крутизна  $S_K = 2$  А/В.

Коэффициент передачи по току в схеме с общим эмиттером равен

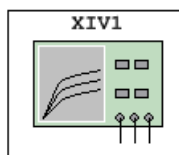
$$\beta_0 = h_{21} = \frac{S_K}{S_B} = \frac{2}{0.33} = 6.06.$$

Напряжение отсечки  $E_{отс}$  можно найти по проходным статическим характеристикам (рис. 1.9), (рис. 1.22) или по данным табл. 3 ( в примере табл. 4). Напряжение отсечки транзистора BF 517, как следует из табл. 3, равно 0.8 В.

8 Снимите выходные статические характеристики транзистора.

Комплекс NI Multisim 12 позволяет построить выходные статические характеристики транзистора с помощью виртуального прибора **Характериограф**.

Скопируйте изображение прибора на рабочий лист, выполнив: **Моделирование** –



### Приборы – Характериограф

Скопируйте из принципиальной схемы транзистор и подключите его к прибору, как показано на рис 1.23.

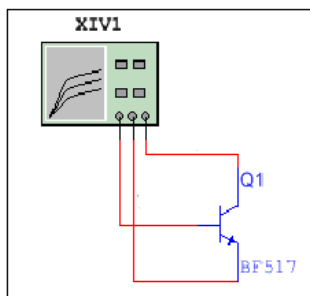


Рис. 1.23

Дважды щелкните по иконке прибора и в появившемся окне рис. 1.24 установите параметры моделирования, «нажав» **Моделирование**.

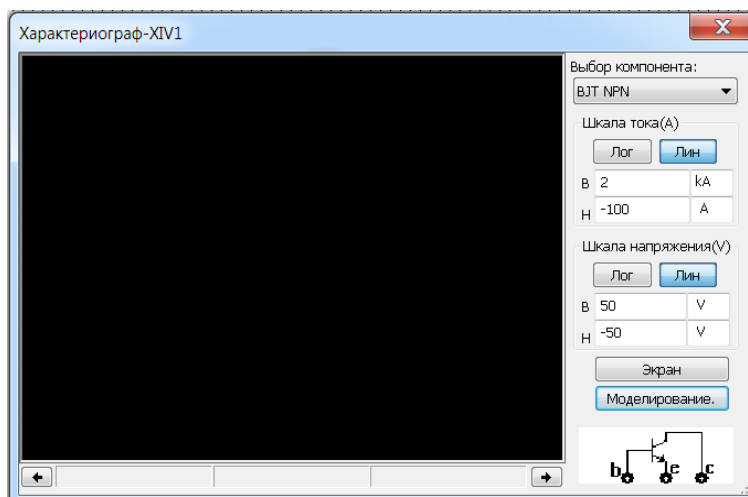


Рис. 1.24

Ориентируясь на данные, полученные при снятии входных и проходных характеристик, задайте диапазоны изменения тока базы и напряжения коллектора - эмиттер.

Например, можно считать, что ток базы транзистора BF 517 изменяется в пределах 10 мА до 1 А (рис. 1.21). Интервал изменения напряжения коллектор-эмиттер можно задать в пределах 2... 20 В. Тогда окно **Параметры моделирования** будет выглядеть так, как показано на рис. 1.25.

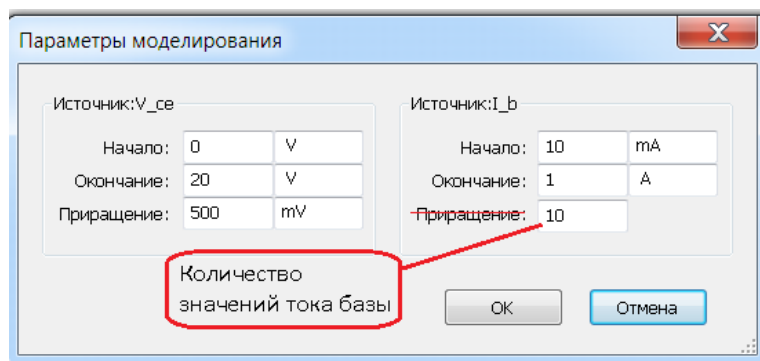


Рис. 1.25

Для снятия характеристик нажмите кнопку **Пуск** (или клавишу **F5**). Дважды щелкните по иконке прибора. Выходные статические характеристик транзистора BF 517 приведены на рис. 1.26.

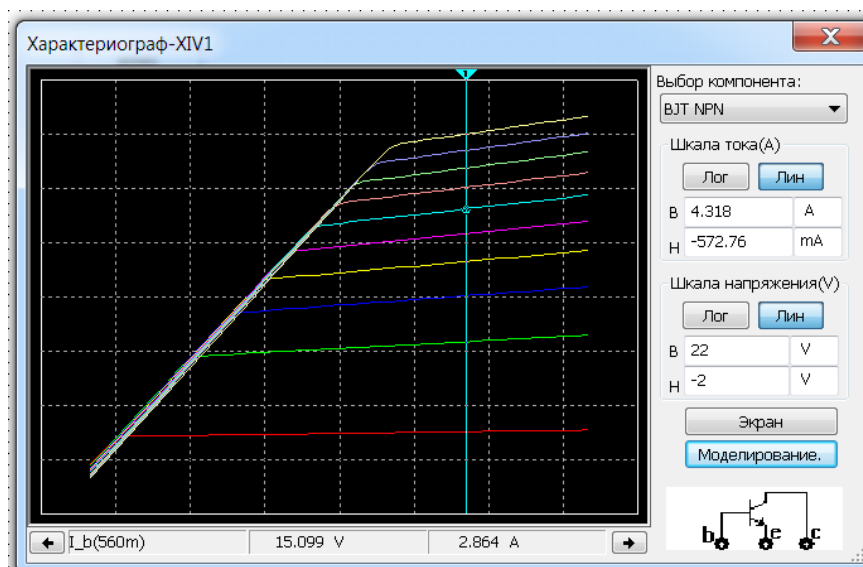




Рис. 1.26

## 9 Рассчитайте $h$ -параметры по выходным характеристикам

В расчетные формулы ([см. п. 1.1.3.2](#)):

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \right|_{U_{КЭ} = const}, \quad h_{22} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_B = const},$$

подставьте необходимые численные значения приращений токов и напряжений, найденные по выходным характеристикам транзистора.

Значения токов и напряжений для конкретной рабочей точки определяются с помощью курсора (рис. 1.27), переместить который можно, захватив мышкой треугольник, расположенный вверху линии  или стрелкой . Значения токов и напряжений считываются с соответствующих окон. Чтобы поместить точку привязки на выбранную характеристику, нужно щелкнуть по этой характеристике.

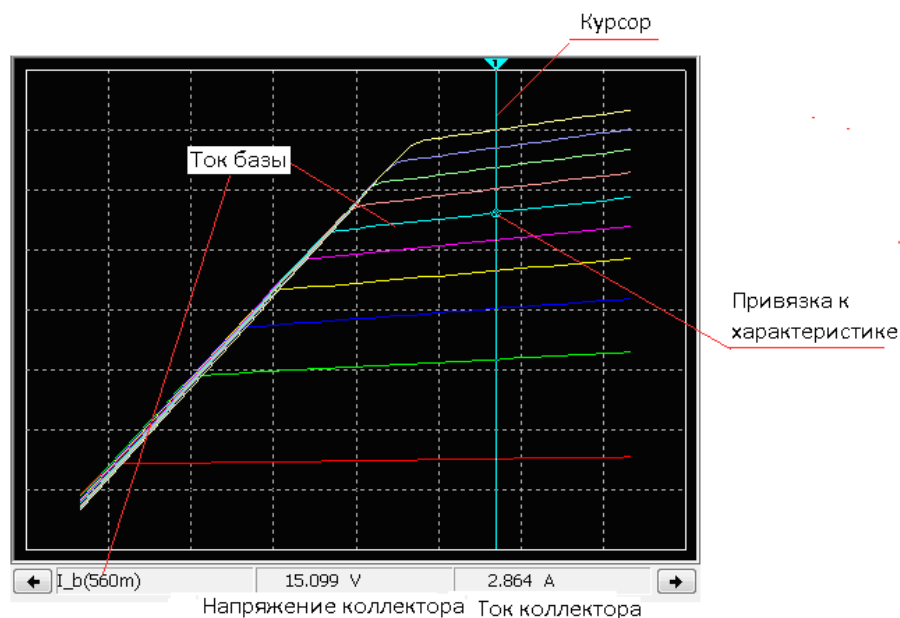


Рис. 1.27

**Пример.** Расчет параметра  $h_{21}$  для транзистора BF 517.

Зададим коллекторное напряжение  $E_K=15$  В. Поместим точку привязки на характеристику при токе базы  $I_{B2}=0.560$  А. Запишем значение тока коллектора  $I_{K2}=2.864$ .

Переместим точку привязки на другую характеристику (рис. 1.28).

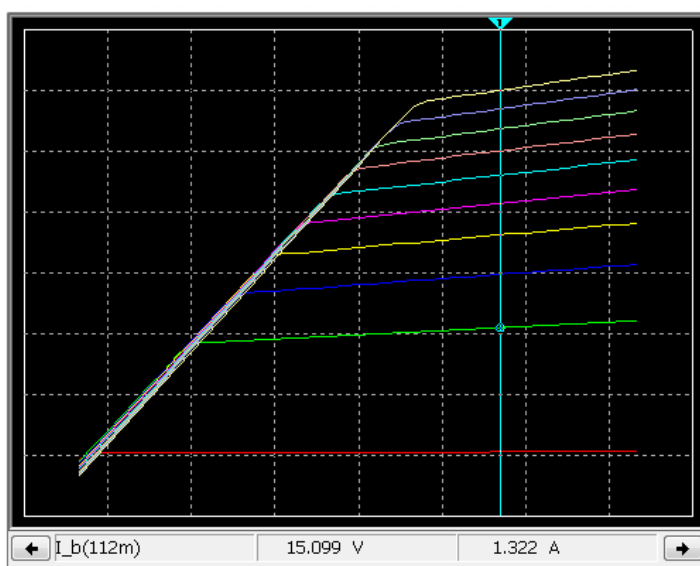


Рис. 1.28

Ток базы  $I_{B1} = 0.112$  А, а ток коллектора  $I_{K1} = 1.322$  А. В соответствии с расчетной формулой найдем коэффициент передачи тока при коротком замыкании на выходе:

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \right|_{U_{KЭ} = const} = \frac{I_{K2} - I_{K1}}{I_{B2} - I_{B1}} = \frac{2.864 - 1.322}{0.560 - 0.112} = 3.457.$$

Обратите внимание, что этот результат отличается от полученного ранее ( $h_{21} = 6.06$ ). Причина расхождения обусловлена зависимостью крутизны тока базы от напряжения коллектор-эмиттер, о чем говорилось выше. В итоговую [таблицу](#) запишем большее из полученных значений.

**Пример.** Расчет параметра  $h_{22}$  для транзистора BF 517.

В соответствии с расчетной формулой нужно выбрать одну из статических выходных характеристик, снятых при неизменном токе базы. Например, при  $I_B = 0.230$  А. Напряжение коллектора  $E_{K2} = 15.099$  В, а ток коллектора  $I_{K2} = 1.886$  А (рис. 1.29).

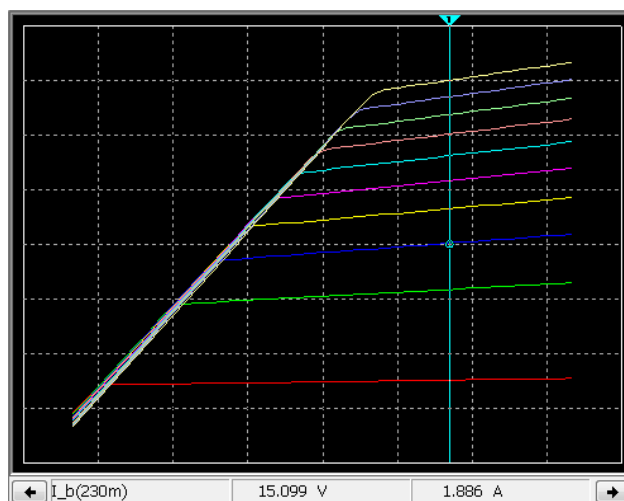


Рис. 1.29

Затем переместим линию маркера влево, например, до напряжения коллектора  $E_{K1} = 10.076$  В. При этом ток коллектора равен  $I_{K1} = 1.782$  А (рис. 1.30).

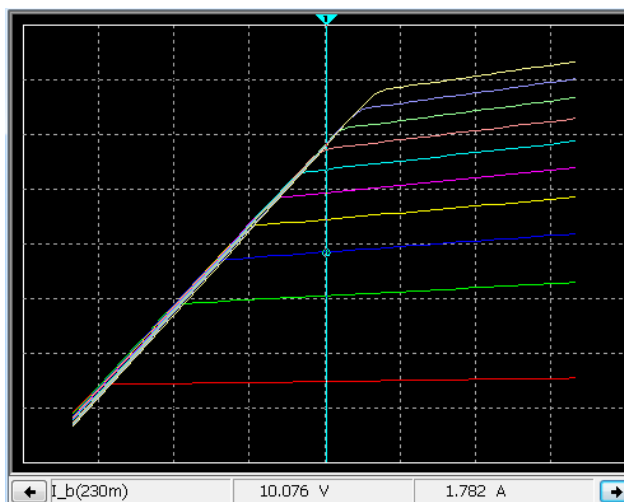


Рис. 1.30

Тогда выходная проводимость при холостом ходе на входе равна

$$h_{22} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{KЭ}} \right|_{I_B = const} = \frac{I_{K2} - I_{K1}}{E_{K2} - E_{K1}} = \frac{1.886 - 1.782}{15.099 - 10.076} = 0.02 \text{ См.}$$

То есть внутреннее сопротивление эквивалентного генератора равно 50 Ом.

Обратите внимание, что выходные статические характеристики идут под разным углом наклона. Следовательно, при одном и том же приращении напряжения коллектора, приращения коллекторного тока будут разными и, следовательно, различными будут и значения параметра  $h_{22}$ .

#### 10 Рассчитайте крутизну линии граничного режима $S_{гр}$ .

Искомая крутизна равна тангенсу угла наклона  $\alpha$  линии граничного режима (рис. 1.31). Как и раньше построим на характеристиках прямоугольный треугольник, гипотенуза которого совпадает с отрезком линии граничного режима. Перемещая линию маркера и активируя соответствующие характеристики, измерим токи коллектора и напряжения коллектора в точках измерения (рис. 1.31).



Рис. 1.31

Затем найдем длины катетов А и В и вычислим значение тангенса угла наклона  $\alpha$  как отношение соответствующих катетов.

**Пример.** Расчет крутизны линии граничного режима транзистора BF 517.

Определим координаты точки 1. Для этого установим линию маркера при  $E_{K1}=12.156 \text{ В}$  и токе базы  $I_{B1}=1 \text{ А}$ . Ток коллектора оказался равным  $I_{K1}=3.57 \text{ А}$ .

Для определения координат точки 2 при неизменном положении линии маркера ( $E_{K2}=12.156 \text{ В}$ ) активируем характеристику при меньшем токе базы, например при  $I_{B2}=0.12 \text{ А}$ . Ток коллектора равен  $I_{K2}=1.325 \text{ А}$ .



Наконец определим координаты точки 3. Переместим линию маркера влево так, чтобы активная точка оказалась на линии граничного режима (в «пучке» характеристик), а ток коллектора был бы равен току точки 2:  $I_{K3} = I_{K2} = 1.325$  А. При этом напряжение коллектора равно  $E_{K3} = 4.545$  В.

Зная координаты вершин треугольника, рассчитаем крутизну ЛГР:

$$S_{ep} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_K} = \frac{I_{K1} - I_{K2}}{E_{K1} - E_{K3}} = \frac{3.570 - 1.325}{12.156 - 4.545} = 0.295 \text{ А/В.}$$

#### 11 Обобщите результаты расчета параметров транзистора

Рассчитанные параметры транзистора следует свести в табл. 4:

Таблица 5

Параметры транзистора \_\_\_\_\_

$h_{11}$ , Ом	$h_{12}$	$h_{21}$	$h_{22}$ , См	$S_B$ , А/В	$S_K$ , А/В	$S_{гр}$ , А/В	$E_{отс}$ , В

**Пример.**

Рассчитанные параметры транзистора BF 517

$h_{11}$ , Ом	$h_{12}$	$h_{21}$	$h_{22}$ , См	$S_B$ , А/В	$S_K$ , А/В	$S_{гр}$ , А/В	$E_{отс}$ , В
3	0.175	6.06	0.02	0.33	2	0.295	0.8

Таблица 6

Основные параметры модели транзистора BF 517

Обозначение в модели	Принятое обозначение параметра	Описание параметра	Значение	Единица измерения
BF	$\beta_0 (h_{21})$	Максимальный коэффициент передачи тока для схемы с ОЭ	99.65	
RB	$r_b$	Сопротивление базы при нулевом смещении	1.5	Ом
RE	$r_e$	Объёмное сопротивление эмиттера	0.5	Ом
RC	$r_k$	Объёмное сопротивление коллектора	2.68	Ом
CJE	$C_j$	Ёмкость перехода база-эмиттер при нулевом смещении	$1.325 \cdot 10^{-12}$	Ф
TF	$\tau_T$	Идеальное время пролета неосновных носителей через базу,	$56.94 \cdot 10^{-12}$	сек
CJC	$C_{bk}$	Ёмкость перехода база-коллектор при нулевом смещении	$1.05 \cdot 10^{-12}$	Ф
TR	$\tau_\beta$	Идеальное время рекомбинации неосновных носителей в базе	$1 \cdot 10^{-9}$	сек
LC	$L_K$	Индуктивность коллектора	$0.350 \cdot 10^{-9}$	Гн
LE	$L_e$	Индуктивность эмиттера	$0.600 \cdot 10^{-9}$	Гн

## 1.3 Содержание отчета

1 Цель работы.

2 Задание на выполнение.

3 Схема измерения параметров транзистора.

Описание назначения компонентов и приборов.

5 Входные и проходные статических характеристик транзистора.

Таблица с результатами измерений. Графики статических характеристик, построенные по данным таблицы.

6 Расчет  $h$ -параметров транзистора по входным статическим характеристикам.

Расчетные формулы и результаты расчета.

7 Расчет крутизны статических характеристик токов базы и коллектора.

Расчетные формулы и результаты расчета.

8 Выходные статические характеристики транзистора.

Таблица с результатами измерений. Графики статических характеристик, построенные по данным таблицы.

9 Расчет  $h$ -параметров по выходным характеристикам.

Расчетные формулы и результаты расчета.

10 Расчет крутизны линии граничного режима  $S_{гр}$ .

Расчетные формулы и результаты расчета.

11 Обобщите результаты расчета параметров транзистора

Таблицы параметров транзистора ([табл. 5](#) и [табл. 6](#)).

## 1.4 Контрольные вопросы

1. При каких условиях снимаются статические характеристики электронных приборов?
2. Нарисуйте принципиальную схему, предназначенную для снятия статических характеристик биполярного транзистора.
3. Входные характеристики биполярного транзистора это...
4. Проходные характеристики биполярного транзистора это...
5. Выходные характеристики биполярного транзистора это...
6. Почему статические характеристики образуют семейство характеристик?
7. Какие параметры транзистора можно оценить по входным статическим характеристикам?
8. Какие параметры транзистора можно оценить по выходным статическим характеристикам?

## Лабораторная работа 2. Расчет энергетического режима транзисторного ГВВ

### Цель работы

- изучение теоретических основ построения генераторов с внешним возбуждением (ГВВ);
- изучение метода энергетического расчета ГВВ;
- расчет ГВВ на транзисторе заданного типа.

### Содержание работы

1. Расчет энергетического режима ГВВ по схеме с общим эмиттером на заданную мощность и максимальный КПД.

**Примечание.** Работа выполняется в форме домашнего задания. Результаты расчета используются при выполнении последующих лабораторных работ.

## 2.1 Теоретические сведения

### 2.1.1 Принципы построения генераторов с внешним возбуждением

#### *Классификация генераторов с внешним возбуждением.*

Генератором с внешним возбуждением (ГВВ) называется каскад радиопередатчика, преобразующий энергию источника питания в энергию высокочастотных колебаний при наличии внешнего возбуждения на входе. По выполняемым функциям генераторы с внешним возбуждением разделяют на усилители мощности и умножители частоты.

ГВВ классифицируются:

- по виду электронного прибора (ЭП) – ламповые, транзисторные;
- по схеме включения ЭП – с общим катодом (эмиттером, истоком), с общей сеткой (базой, затвором);
- по виду схем питания входной и выходной цепей – последовательные и параллельные;
- по полосе усиления – узкополосные, широкополосные;
- по напряженности режима работы ЭП – недонапряженный, граничный, перенапряженный, ключевой;
- по величине угла отсечки анодного (коллекторного) тока – без отсечки (класс А), с углом отсечки тока 90 град. (класс В), с отсечкой меньше 90 град. (класс С).

#### *Уравнение коллекторного тока.*

Рассмотрим случай работы биполярного транзистора в области нижних частот при возбуждении гармоническим напряжением. При этом транзистор можно считать безынерционным активным элементом.

Принципиальная схема ГВВ на биполярном транзисторе приведена на рис.2.1.

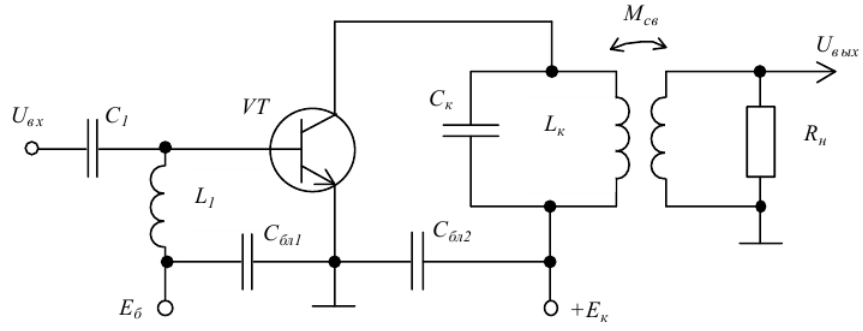


Рис. 2.1

На вход генератора подается гармоническое напряжение  $u_{вх}(t) = U_{мб} \cos \omega t$ . Напряжение на базе

$$e_{б}(t) = E_{б} + u_{вх}(t) = E_{б} + U_{мб} \cos \omega t \quad (2.1)$$

где  $E_{б}$  — напряжение смещения;  $U_{мб}$  — амплитуда напряжения возбуждения. Ток коллектора  $i_{к}(t) = S(e_{б}(t) - E_{омс})$ , где  $S$  — крутизна аппроксимированной проходной характеристики транзистора,  $E_{омс}$  — напряжение отсечки коллекторного тока. Подставляя сюда выражение (2.1), получим:

$$i_{к}(t) = SU_{мб}(\cos \omega t - \cos \theta) \text{ при } -\theta < \omega t < \theta, \quad (2.2)$$

где  $\cos \theta = \frac{E_{омс} - E_{б}}{U_{мб}}$ ;  $\theta$  - угол отсечки коллекторного тока (рис. 2.2).

Максимальное значение импульса коллекторного тока (рис. 2.2) получим при подстановке  $\omega t = 0$  в формулу (2.2):

$$I_{к\max} = SU_{мб}(1 - \cos \theta). \quad (2.3)$$

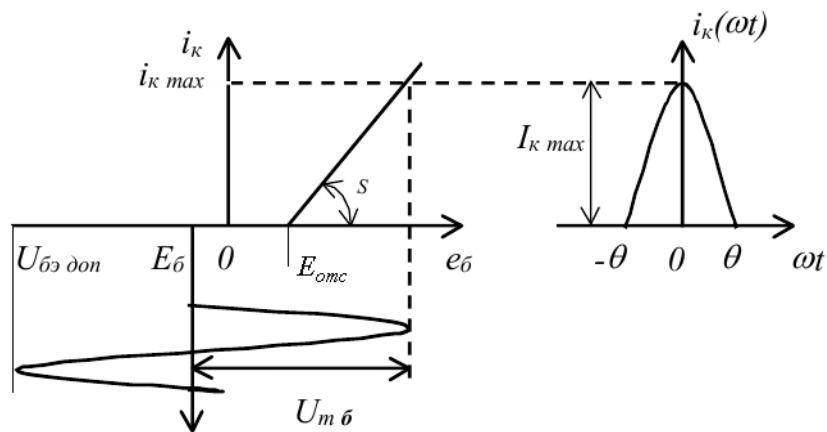


Рис. 2.2

Периодическая последовательность импульсов коллекторного тока разлагается в ряд Фурье:

$$i_{к(t)} = I_{к0} + \sum_{n=1}^{\infty} I_{кn} \cos n\omega t$$

где  $I_{\kappa 0}$  — постоянная составляющая,  $I_{\kappa n}$  — амплитуда  $n$ -й гармоники коллекторного тока:

$$I_{\kappa 0} = \alpha_0(\theta) I_{\kappa \max}, \quad I_{\kappa n} = \alpha_n(\theta) I_{\kappa \max}.$$

Здесь  $\alpha_0(\theta)$ ,  $\alpha_n(\theta)$  - коэффициенты Берга. В режиме усиления мощности колебательный контур в коллекторной цепи транзистора настроен на частоту первую гармонику импульсов коллекторного тока. При этом напряжение на коллекторе

$$e_{\kappa}(t) = E_{\kappa} - U_{m\kappa} \cos \omega t, \quad (2.4)$$

где  $E_{\kappa}$  — напряжение коллекторного питания,  $U_{m\kappa}$  — амплитуда переменного напряжения.

Амплитуда коллекторного напряжения зависит от величины сопротивления нагрузки для первой гармоники импульсов коллекторного тока  $R_{\kappa}$ :

$$U_{m\kappa} = I_{\kappa 1} R_{\kappa} \quad (2.5)$$

В схеме на рис. 2.1  $R_{\kappa} = R_{рез} = R_{\varepsilon}$ , где  $R_{рез}$  — резонансное (эквивалентное) сопротивление колебательного контура. В случае частичного включения контура в коллекторную цепь транзистора сопротивление нагрузки меньше, чем резонансное сопротивление колебательного контура, а именно  $R_{\kappa} = p^2 R_{рез}$ , где  $p \leq 1$  — коэффициент включения.

В режиме умножения частоты контур в цепи коллектора настроен на  $n$ -ю гармонику импульсов коллекторного тока. При этом напряжение на коллекторе

$$e_{\kappa}(t) = E_{\kappa} - I_{\kappa n} R_{\kappa n} \cos n \omega t.$$

### ***Баланс мощностей в коллекторной цепи.***

Мощность, потребляемая от источника коллекторного питания, равна  $P_0 = I_{\kappa 0} E_{\kappa}$ . Часть этой мощности преобразуется ЭП (транзистором) в полезную мощность высокочастотных колебаний  $P_1 = 0.5 I_{\kappa 1} U_{m\kappa 1}$ , передаваемую в контур. Остальная часть потребляемой мощности рассеивается на коллекторе транзистора. Очевидно  $P_0 = P_1 + P_{\kappa}$ , где  $P_{\kappa}$  - мощность, рассеиваемая на коллекторе.

Электронный коэффициент полезного действия (КПД) каскада  $\eta_{\varepsilon} = P_1 / P_0$ . Подставив выражения для полезной и потребляемой мощностей, получим:

$$\eta_{\varepsilon} = \frac{\xi \alpha_1(\theta)}{2 \alpha_0(\theta)} = 0.5 \xi g_1(\theta), \quad (2.6)$$

где  $\xi = U_{m\kappa} / E_{\kappa}$  - коэффициент использования коллекторного напряжения,  $g_1(\theta) = \alpha_1(\theta) / \alpha_0(\theta)$  - коэффициент формы.

Амплитуда коллекторного напряжения равна  $U_{mk} = I_{k1}R_k = \alpha_1(\theta)I_{k\max}R_k$ , тогда выражение для электронного КПД примет вид:

$$\eta_e(\theta) = \frac{I_{k\max}R_k}{2E_k} \frac{\alpha_1^2(\theta)}{\alpha_0(\theta)},$$

то есть КПД является функцией угла отсечки  $\theta$  и отношение  $\frac{\alpha_1^2(\theta)}{\alpha_0(\theta)}$  принимает максимальное значение при угле отсечки 88 градусов (рис. 2.3). Следовательно, и электронный КПД при таком угле будет наибольшим.

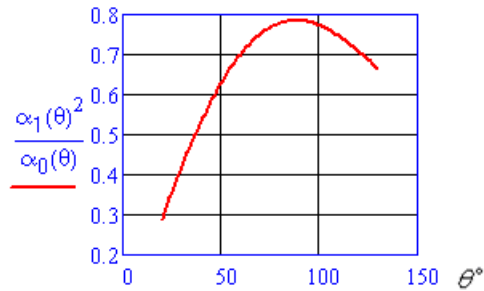


Рис. 2.3

При более детальном анализе зависимости КПД от угла отсечки, оказывается, что при расчете каскада на заданную полезную мощность возникают дополнительные ограничения, обусловленные требованием обеспечения граничного режима. При этом максимум КПД не совпадает с максимумом функции рис. 2.3. Поэтому в настоящей лабораторной работе используется [метод расчета](#) энергетического режима ГВВ, оптимизирующий угол отсечки коллекторного тока, при котором КПД максимальный.

#### **Баланс мощностей во входной цепи.**

При положительном напряжении смещения на базе биполярного транзистора с  $n$ - $p$ - $n$  проводимостью, баланс мощностей во входной цепи можно записать в следующем виде:  $P_{\delta} = P_{см} + P_{возб}$ , где  $P_{возб}$  — мощность возбуждения,  $P_{см} = E_{\delta}I_{\delta 0}$  — мощность, потребляемая от источника напряжения смещения,  $I_{\delta 0}$  — постоянная составляющая тока базы,  $P_{\delta}$  — мощность, рассеиваемая на базе. Если смещение на базе отрицательно  $E_{\delta} < 0$ , постоянная составляющая базового тока протекает против ЭДС источника смещения. При этом баланс мощностей во входной цепи записывается в следующем виде:

$$P_{возб} = P_{см} + P_{\delta}.$$

Это означает, что часть мощности возбуждения расходуется на создание автоматического базового смещения и рассеивается на резисторе цепи автоматического смещения.

#### **Динамические характеристики ГВВ.**

Динамическими характеристиками (ДХ) генератора с внешним возбуждением называются зависимости тока одного из электродов ЭП от напряжения на соответствующем электроде в динамическом режиме. Наиболее распространенными являются зависимости коллекторного тока от напряжения на коллекторе  $i_k = a(e_k)$ , построенные в семействе выходных статических характеристик. Пример ДХ для  $\theta > 90^\circ$  приведен на рис. 2.4.

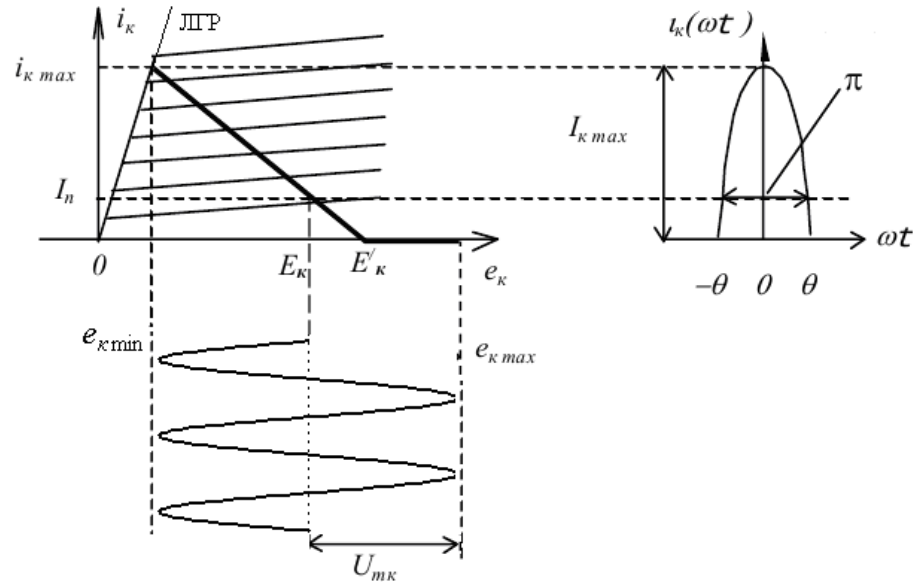


Рис. 2.4. Динамическая характеристика ГВВ при  $\theta > 90^\circ$ .  $I_n$  - ток покоя, протекающий в коллекторной цепи транзистора при отсутствии напряжения возбуждения на входе;  $E_k$  — напряжение питания;  $U_{mk}$  — амплитуда переменного напряжения на коллекторе;  $e_{k \min}$  и  $e_{k \max}$  — соответственно минимальное и максимальное мгновенные значения напряжения на коллекторе; ЛГР — линия граничного режима.

Аналитическое выражение для динамической характеристики имеет следующий вид:

$$i_k = -\frac{1}{\gamma_1(\theta)R_k}(e_k - E'_k) \quad (2.7)$$

где  $E'_k = E_k - U_{mk} \cos \theta$ ,  $\gamma_1(\theta) = \frac{2\theta - \sin 2\theta}{2\pi}$ . Функция (2.7) является уравнением прямой линии с отрицательным угловым коэффициентом. Отметим, что наклон ДХ определяется не только величиной сопротивления коллекторной нагрузки  $R_k$ , но и зависит от угла отсечки коллекторного тока  $\theta$ .

### **Режимы работы генератора с внешним возбуждением.**

Различают следующие четыре режима работы генератора с внешним возбуждением: 1) — недонапряжённый, 2) — граничный (критический), 3) — перенапряжённый, 4) — ключевой. Рассмотрим вначале первые три.

1. *Недонапряжённый режим* (рис. 2.5 ДХ 1). При малых сопротивлениях коллекторной нагрузки каскад находится в недонапряженном режиме. В этом случае импульс коллекторного тока имеет косинусоидальную форму, полезная мощность и КПД каскада сравнительно невелики, большая мощность рассеивается на коллекторе транзистора.

При увеличении сопротивления коллекторной нагрузки каскад вначале переходит в критический, а затем в перенапряженный режим.

2. В *граничном режиме* (рис. 2.5 ДХ 2) вершина импульса коллекторного тока формируется в области резкого изгиба выходных ВАХ, т.е. точка динамической характеристики  $(e_{\text{кmin}}, i_{\text{кmax}})$  расположена на *линии граничного режима* (рис. 2.4). Крутизна этой линии обратно пропорциональна сопротивлению насыщения транзистора:

$$S_{\text{гр}} = 1/r_{\text{нас}}.$$

Следовательно, амплитуда импульса коллекторного тока в граничном режиме равна  $i_{\text{кmaxгр}} = \frac{e_{\text{кmaxгр}}}{r_{\text{нас}}}$ .

Вершина импульсов коллекторного тока становится слегка приплюснутой, но в первом приближении расчет спектральных составляющих с использованием коэффициентов Берга остается справедливым.

3. В *перенапряженном режиме* (рис. 2.5 ДХ 3) в импульсе коллекторного тока появляется провал, полезная мощность уменьшается.

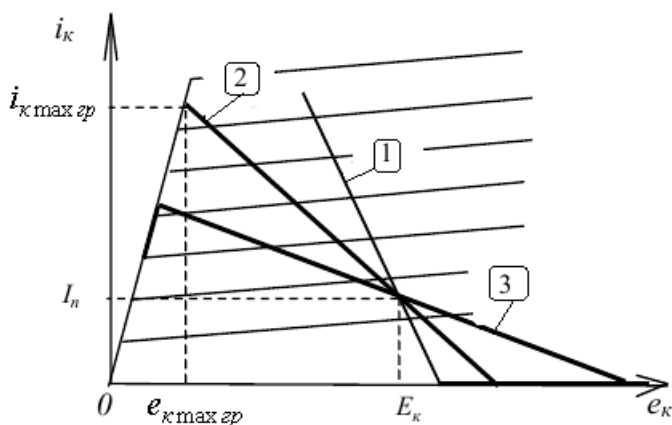


Рис. 2.5. Динамические характеристики недонапряженного (1), граничного (2) и перенапряженного (3) режимов.

Как следует из (2.7) и рис. 2.5, напряженность режима зависит от сопротивления коллекторной нагрузки  $R_k$ , изменяют которое чаще всего следующими способами:

— путем изменения связи контура с нагрузкой  $M_{\text{св}}$  (см. рис. 2.1). При этом изменяется вносимое в контур сопротивление  $r_{\text{вн}}$  и, следовательно, резонансное сопротивление



контура  $R_{рез} = \frac{\rho^2}{r_0 + r_{вн}}$ , где  $\rho$  - характеристическое сопротивление контура,  $r_0$  - сопротивление потерь ненагруженного контура;

— изменением коэффициента включения контура в коллекторную цепь транзистора  $R_k = p^2 R_{рез}$ , где  $p$  – коэффициент включения.

## 2.1.2 Расчет энергетического режима транзисторного ГВВ на заданную мощность и максимальный КПД

Порядок расчета энергетического режима транзисторного ГВВ по схеме с ОЭ рассмотрим на конкретном примере. Расчет производится в программе Mathcad.

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЖИМА ГВВ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ ПО СХЕМЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ ПРИ УГЛЕ ОТСЕЧКИ МЕНЬШЕ 180 ГРАДУСОВ НА ЗАДАННУЮ МОЩНОСТЬ ПРИ ПОЛНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОЛЛЕКТОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ. ИЗМЕНЯЕМЫЙ ПАРАМЕТР - ВЕЛИЧИНА УГЛА ОТСЕЧКИ КОЛЛЕКТОРНОГО ТОКА. ОПТИМИЗИРУЕМЫЙ ПАРАМЕТР - КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА:

НОМИНАЛЬНАЯ ПОЛЕЗНАЯ МОЩНОСТЬ, ПРИХОДЯЩАЯСЯ НА ОДИН ТРАНЗИСТОР  $P_{1ном}$ ;  
 ДИАПАЗОН РАБОЧИХ ЧАСТОТ  $f_{н...f_{в}}$  МГц  
 ДИАПАЗОН ИЗМЕНЕНИЯ УГЛА ОТСЕЧКИ КОЛЛЕКТОРНОГО ТОКА  $\theta_{мин...}\theta_{макс}$  ГРАД.;  
 КОЭФФИЦИЕНТ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ  $КБВ_{взмин}$

**Внимание!** Для задания исходных данных и параметров транзистора введите их в столбцы "Значения". Имена, заголовки матриц и столбцы "Параметр" изменять нельзя.

ИсхДанные :=	"Параметр"	"Значение"
	"Мощность, Вт"	3
	"Нижняя частота"	$1 \cdot 10^6$
	"Верхняя частота"	$10 \cdot 10^6$
	"Мин. угол отсечки"	20
	"Макс. угол отсечки"	130
	"КБВ"	0.7

### ТРАНЗИСТОР ТИПА BF 517

Параметры идеализированных статических характеристик транзистора

Параметры1 :=	"Параметр"	"Значение"
	" $r_{нас}$ , Ом"	0.4
	" $r_b$ , Ом"	1.5
	" $r_э$ , Ом"	0.5
	" $R_{у.э}$ , Ом"	$100 \cdot 10^3$
	" $h_{21}$ или $\beta_0$ "	99
	" $E_{отс}$ , В"	0.8

## Высокочастотные параметры транзистора

$$\text{Параметры2} := \begin{pmatrix} \text{"Параметр"} & \text{"Значение"} \\ \text{"ГТ, Гц"} & 200 \cdot 10^6 \\ \text{"Ск, Ф"} & 1.05 \cdot 10^{-12} \\ \text{"Сэ, Ф"} & 1.325 \cdot 10^{-12} \\ \text{"Лэ, Гн"} & 0.6 \cdot 10^{-9} \\ \text{"Лб, Гн"} & 0.5 \cdot 10^{-9} \end{pmatrix}$$

## Допустимые параметры транзистора

$$\text{Параметры3} := \begin{pmatrix} \text{"Параметр"} & \text{"Значение"} \\ \text{"Uк.доп, В"} & 35 \\ \text{"Ебэ.доп, В"} & 3.5 \\ \text{"Ik0.доп, А"} & 3 \\ \text{"Ik.доп, А"} & 5 \end{pmatrix}$$

### РАСЧЕТ КОЛЛЕКТОРНОЙ ЦЕПИ

1. Для вычисления напряжения на коллекторе  $E_k$  задаем коэффициент  $c$  в пределах 0.46...0.543

$$c := 0.46 \quad E_k := c \cdot U_{к.доп} \quad E_k = 16.1$$

Напряжение  $E_n$  источника коллекторного питания должно быть на  $e=0.1...0.5$  В больше  $E_k$  или равно стандартному значению

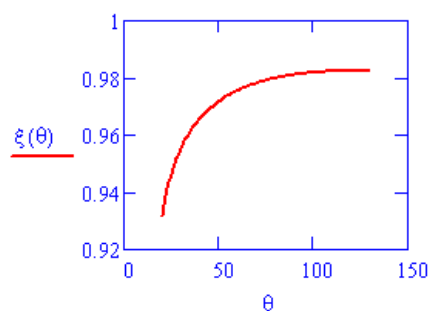
$$e := 0.3 \quad E_n := E_k + e \quad E_n = 16.4$$

2. Коэффициент использования коллекторного напряжения в граничном режиме.

$$\xi(\theta) := \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + \sqrt{1 - 8 \cdot \text{гнас} \cdot \frac{P_{1\text{ном}}}{\text{alfa1}(\theta) \cdot E_k^2}} \right)$$

Здесь и далее проводится проверка допустимости полученных результатов расчета:

$$\text{проверка}_\xi = \text{"Расчет можно продолжить"}$$



### 3. Амплитуда первой гармоники коллекторного напряжения

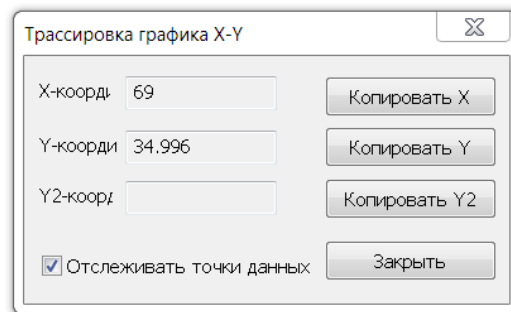
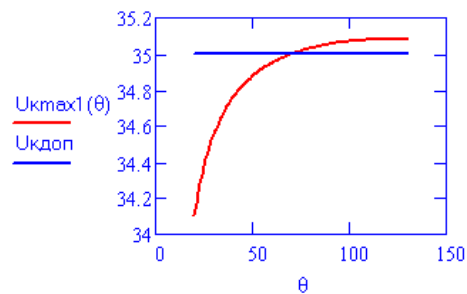
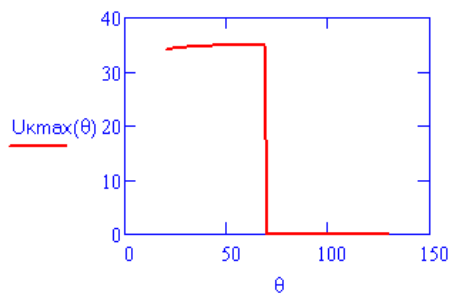
$$U_{k1rP}(\theta) := E_k \cdot \xi(\theta)$$

4. Максимальное напряжение на коллекторе должно быть меньше допустимого. Для проверки выполнения этого условия зададим коэффициент  $b=1.2 \dots 1.3$

$$b := 1.2$$

$$U_{kmax1}(\theta) := E_k + b \cdot U_{k1rP}(\theta)$$

$$U_{kmax}(\theta) := \text{if}(U_{kmax1}(\theta) \leq U_{kдоп}, U_{kmax1}(\theta), 0)$$



Из графиков следует, что коллекторное напряжение  $U_{kmax}(\theta)$  превышает допустимое при угле отсечки больше 69 градусов. Следовательно, нужно в матрице [ИсхДанные](#) задать «Макс. угол отсечки» 69. (В рассматриваемом примере мы не будем этого делать. Просто при дальнейших расчетах учтем, что угол отсечки не должен быть больше 69 градусов).

### 5. Амплитуда первой гармоники коллекторного тока.

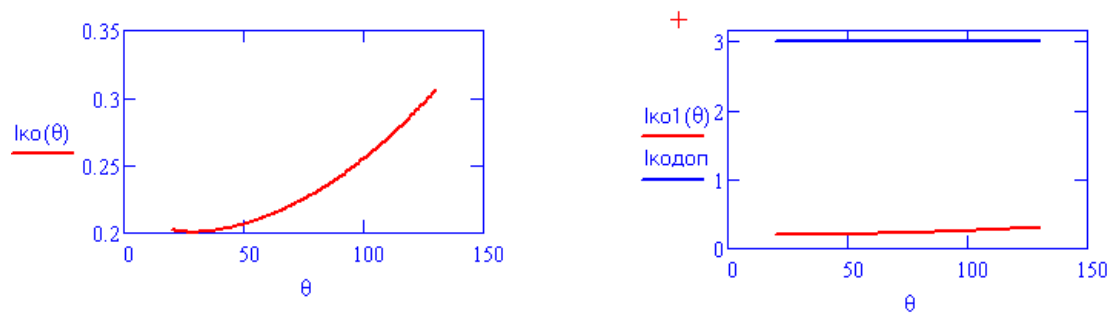
$$I_{k1}(\theta) := 2 \cdot \frac{P_{1ном}}{U_{k1rP}(\theta)}$$

### 6. Постоянная составляющая коллекторного тока

$$I_{ko1}(\theta) := \frac{\alpha_0(\theta)}{\alpha_1(\theta)} \cdot I_{k1}(\theta)$$

Постоянная составляющая коллекторного тока должна быть меньше допустимого значения:

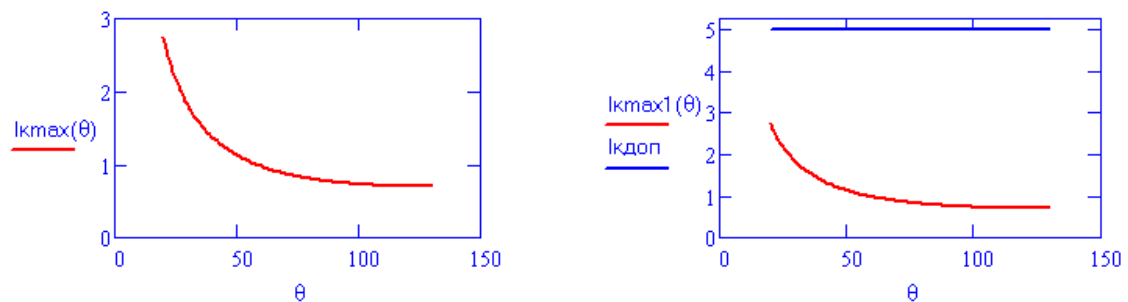
$$I_{ko}(\theta) := \text{if}(I_{ko1}(\theta) \leq I_{кодоп}, I_{ko1}(\theta), 0)$$



7. Амплитуда импульса коллекторного тока:

$$I_{kmax1}(\theta) := \frac{I_{ko}(\theta)}{\alpha_{fa0}(\theta)}$$

$$I_{kmax}(\theta) := \text{if}(I_{kmax1}(\theta) \leq I_{kдоп}, I_{kmax1}(\theta), 0)$$



8. Мощность, потребляемая от источника коллекторного питания:

$$P_{omax}(\theta) := E_k \cdot I_{ko}(\theta)$$

9. Электронный коэффициент полезного действия:

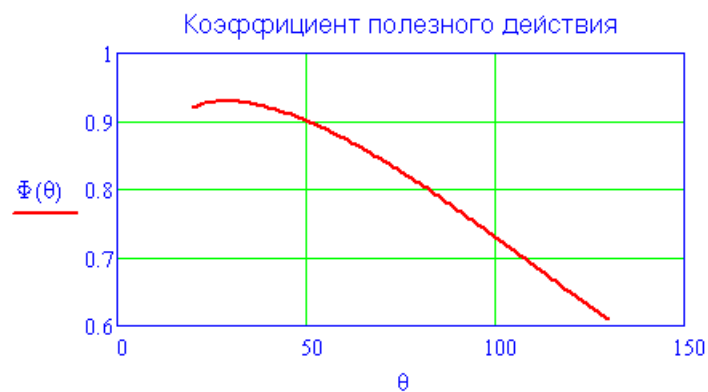
$$\Phi(\theta) := \frac{P_{1ном}}{P_{omax}(\theta)}$$

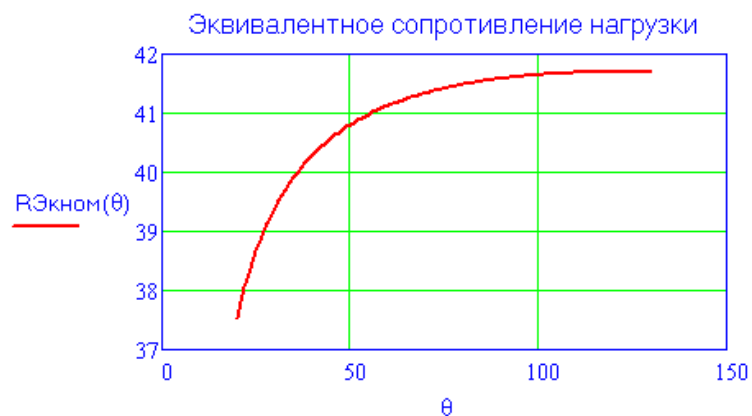
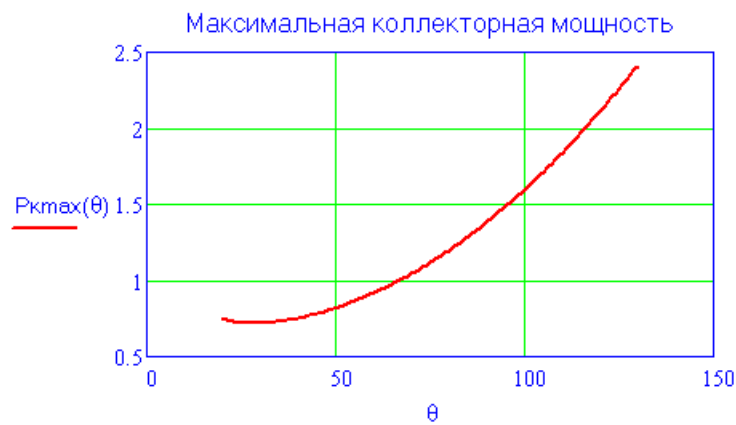
10. Максимальная мощность, рассеиваемая на коллекторе:

$$P_{kmax}(\theta) := P_{omax}(\theta) - P_{1ном} \cdot \sqrt{KB \cdot V_{x\min}}$$

11. Номинальное сопротивление нагрузки:

$$R_{Экном}(\theta) := \frac{U_{k1гP}(\theta)^2}{2 \cdot P_{1ном}}$$





Оптимальный угол отсечки соответствует равенству нулю производной от КПД. Корень уравнения - **zeroval**; **x** - начальное значение корня определяется по графику зависимости КПД от угла отсечки.

**x := 25**

$$\text{zeroval} := \text{root}\left(\frac{d}{dx} \Phi(x), x\right) \quad \text{zeroval} = 28.494$$

**ПАРАМЕТРЫ КОЛЛЕКТОРНОЙ ЦЕПИ ДЛЯ ДВУХ УГЛОВ ОТСЕЧКИ – ОПТИМАЛЬНОГО И ЗАДАННОГО**

**θ1 := zeroval**

**θ2 := 90**

проверка(U\_kmax(θ1)) = "Режим нормальный"

проверка(U\_kmax(θ2)) = "Транзистор сгорел"

проверка(I\_ko(θ1)) = "Режим нормальный"

проверка(I\_ko(θ2)) = "Режим нормальный"

проверка(I\_kmax(θ1)) = "Режим нормальный"

проверка(I\_kmax(θ2)) = "Режим нормальный"

Обратите внимание, что при угле отсечки 90 градусов не выполняется условие по допустимому коллекторному напряжению. Поэтому зададим  $\theta_2=69$  и повторим расчет, нажав клавишу F9:

$$\theta 1 := \text{zeroval}$$

$$\theta 2 := 69$$

проверка(Ukmax(θ1)) = "Режим нормальный"

проверка(Ukmax(θ2)) = "Режим нормальный"

проверка(Iko(θ1)) = "Режим нормальный"

проверка(Iko(θ2)) = "Режим нормальный"

проверка(Ikmax(θ1)) = "Режим нормальный"

проверка(Ikmax(θ2)) = "Режим нормальный"

Результаты расчета коллекторной цепи.

	0	1	2	3
0	"Параметр"	"θ1"	"θ2"	"Доп. знач."
1	"Uk1 В"	15.337	15.747	"н/д"
2	"Ukmax В"	34.504	34.996	35
3	"Ik1 А"	0.391	0.381	"н/д"
КолекЦепь = 4	"Ik0 А"	0.2	0.22	3
5	"Ikmax А"	1.908	0.883	5
6	"P0max Вт"	3.228	3.541	"н/д"
7	"Pkmax Вт"	0.718	1.031	"н/д"
8	"КПД"	0.929	0.847	"н/д"
9	"RЭном Ом"	39.203	41.327	"н/д"

Видно, что при оптимальном угле отсечки КПД больше на 7%, по сравнению с максимально допустимым углом 69 градусов.

### РАСЧЕТ ВХОДНОЙ (БАЗОВОЙ) ЦЕПИ

По результатам расчета коллекторной цепи задается угол отсечки θ

$$\theta := 50$$

При расчете базовой цепи следует задать оптимальное значение угла отсечки, полученное при расчете коллекторной цепи. Оптимальный угол равен 28.5 град. Но дальнейшие расчеты показали, что при таком угле отсечки требуется большое отрицательное напряжение смещения и большая амплитуда напряжения возбуждения. При этом оказывается, что модуль максимального обратного напряжения на эмиттерном переходе превышает допустимое значение. Поэтому пришлось принять угол отсеки больше оптимального (50 град.), при котором допустимое напряжение не превышено.

1. Дополнительное сопротивление  $R_{\text{доп}}$ , которое включается между базой и эмиттером:

$$R_{\text{доп}} := \frac{h_{210Э}}{2 \cdot \pi \cdot f_T \cdot C_{э} \cdot \left( 1 - \frac{h_{210Э}}{2 \cdot \pi \cdot f_T \cdot C_{э} \cdot R_{YЭ}} \right)} \quad R_{\text{доп}} = 1.467 \times 10^5$$

**Внимание .** Если в пунктах 3 и/или 5 появится сообщение "транзистор сгорел", то нужно уменьшить сопротивление  $R_{\text{доп}}$  и/или увеличить угол отсечки.

$$R_{\text{доп}} := 50$$

По результатам предварительных расчетов пришлось уменьшить сопротивление  $R_{\text{доп}}$  до 50 Ом.

2. Амплитуда первой гармоники тока базы:

$$h(f) := \left( h_{210Э} \cdot \frac{f}{f_T} \right) \quad X := 1 + \gamma_1(\theta) \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_T \cdot C_k \cdot R_{Экном}(\theta)$$

$$I_b(f) := X \cdot \frac{I_{k1}(\theta)}{h_{210Э} \cdot \gamma_1(\theta)} \cdot \sqrt{1 + h(f)^2}$$

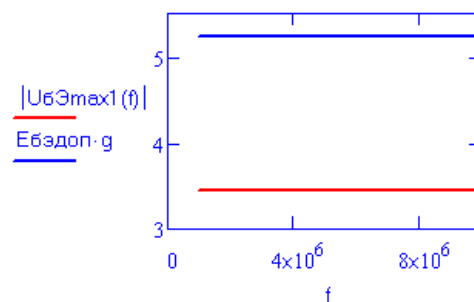
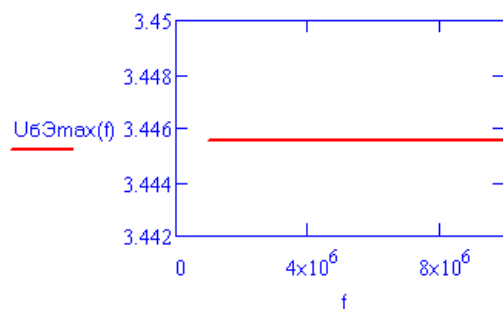
3. Максимальное обратное напряжение на эмиттерном переходе

$$U_{бЭ\max1}(f) := \left| -I_b(f) \cdot R_{\text{доп}} \cdot \frac{1 + \cos(q(\theta))}{\sqrt{1 + h(f)^2}} \right| + E_{отс}$$

ЗАДАДИМ КОЭФФИЦИЕНТ  $g = 1.2 \dots 1.5$

$$g := 1.5$$

$$U_{бЭ\max}(f) := \text{if}(|U_{бЭ\max1}(f)| < E_{бдоп} \cdot g, |U_{бЭ\max1}(f)|, 0) \quad E_{бдоп} \cdot g = 5.25$$



проверка( $U_{бЭ\max}(f_n)$ ) = "Режим нормальный"

проверка( $U_{бЭ\max}(f_v)$ ) = "Режим нормальный"

4. Постоянные составляющие базового и эмиттерного токов

$$I_{б0} := \frac{I_{k0}(\theta)}{h_{210Э}} \quad I_{Э0} := I_{k0}(\theta) + I_{б0}$$

5. Напряжение смещения на эмиттерном переходе

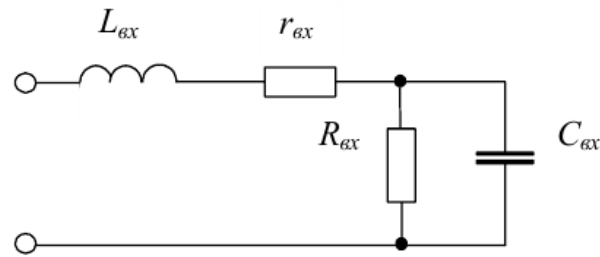
$$E_{б1}(f) := -I_b(f) \cdot \gamma_0(180 - \theta) \cdot \frac{R_{\text{доп}}}{\sqrt{1 + h(f)^2}} + E_{отс} + I_{б0} \cdot r_b + I_{Э0} \cdot r_э$$

$$E_{б}(f) := \text{if}(|E_{б1}(f)| < E_{бдоп}, |E_{б1}(f)|, 0) \quad E_{бдоп} = 3.5$$

проверка( $E_{б}(f_n)$ ) = "Режим нормальный"

проверка( $E_{б}(f_v)$ ) = "Режим нормальный"

## 6. Параметры элементов эквивалентной схемы входной цепи транзистора



$$L_{\text{вхОЭ}} := L_6 + \frac{L_9}{X}$$

$$g_{\text{вхОЭ}} := \frac{1}{X} \cdot \left[ (1 + \gamma_1(\theta) \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{\text{ка}} \cdot R_{\text{Экном}}(\theta)) \cdot r_6 + r_9 \dots \right. \\ \left. + \gamma_1(\theta) \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_9 \right]$$

$$R_{\text{вхОЭ}} := \frac{1}{X} \cdot [r_6 + (1 + \gamma_1(\theta) \cdot h_{21\text{ОЭ}}) \cdot r_9] - g_{\text{вхОЭ}} \dots \\ + R_{\text{доп}} \cdot (1 - \gamma_1(\theta))$$

$$C_{\text{вхОЭ}} := \frac{h_{21\text{ОЭ}}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_{\text{вхОЭ}}}$$

Резистивная и реактивная составляющие входного сопротивления:

$$g_{\text{вх}}(f) := g_{\text{вхОЭ}} + \frac{R_{\text{вхОЭ}}}{1 + h(f)^2}$$

$$x_{\text{вх}}(f) := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{\text{вхОЭ}} - \frac{R_{\text{вхОЭ}} \cdot h(f)}{1 + h(f)^2}$$

## 7. Входная мощность:

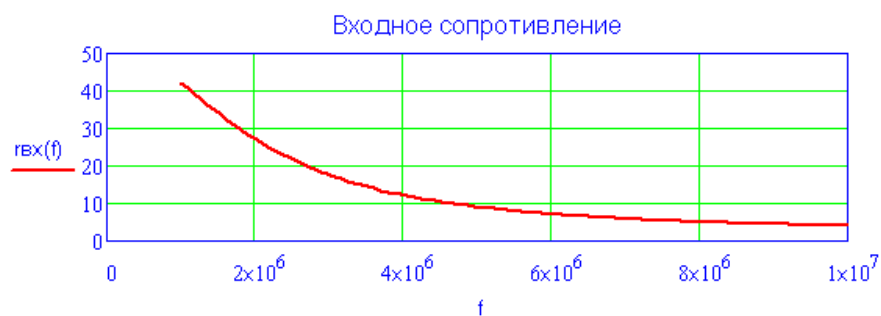
$$P_{\text{вх}}(f) := 0.5 \cdot I_6(f)^2 \cdot \frac{g_{\text{вх}}(f)}{\left(1 + \frac{g_{\text{вх}}(f)}{R_{\text{доп}}}\right)}$$

## 8. Коэффициент усиления по мощности

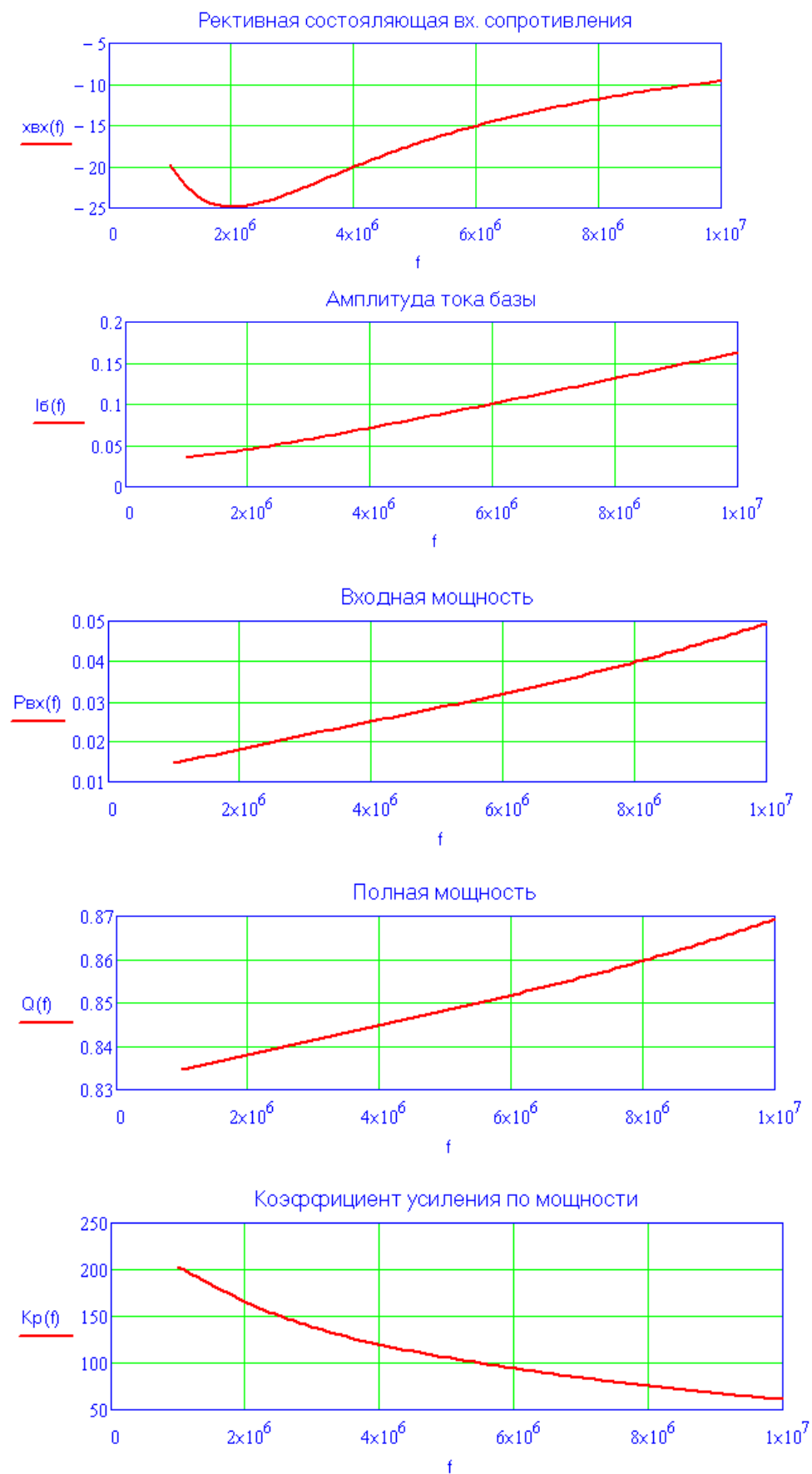
$$K_p(f) := \frac{P_{1\text{ном}}}{P_{\text{вх}}(f)}$$

## 9. Полная мощность, рассеиваемая на транзисторе

$$Q(f) := P_{\text{кmax}}(\theta) + P_{\text{вх}}(f)$$







**РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ВХОДНОЙ ЦЕПИ НА НИЖНЕЙ И ВЕРХНЕЙ ЧАСТОТАХ РАБОЧЕГО ДИАПАЗОНА**

### Параметры эквивалентной схемы входной цепи

$$\text{СопрВх} = \begin{pmatrix} \text{"Параметр"} & \text{"Значение"} \\ \text{"Rвх.ОЭ, Ом"} & 49.808 \\ \text{"гвх.ОЭ, Ом"} & 2.08 \\ \text{"Lвх.ОЭ, Гн"} & 1.096 \times 10^{-9} \\ \text{"Cвх.ОЭ, Ф"} & 1.582 \times 10^{-9} \\ \text{"Rдоп, Ом"} & 50 \end{pmatrix}$$

### Параметры базовой цепи

$$\text{БазЦепь} = \begin{pmatrix} \text{"Параметр"} & \text{"fн"} & \text{"fв"} \\ \text{"гвх, Ом"} & 42.085 & 4.033 \\ \text{"хвх, Ом"} & -19.796 & -9.599 \\ \text{"Uбэ.мах, В"} & 3.446 & 3.446 \\ \text{"Еб, В"} & 0.233 & 0.233 \\ \text{"Iб1, А"} & 0.036 & 0.163 \\ \text{"Рвх, Вт"} & 0.015 & 0.049 \\ \text{"Полная м-ть, Вт"} & 0.835 & 0.869 \\ \text{"Кр"} & 203.298 & 60.769 \end{pmatrix}$$

Обратите внимание, что коэффициент усиления по мощности изменяется в больших пределах: от 203 до 61. Если техническое задание не допускает такого изменения параметра, то нужно использовать транзистор с большей граничной частотой.

### Параметры коллекторной цепи

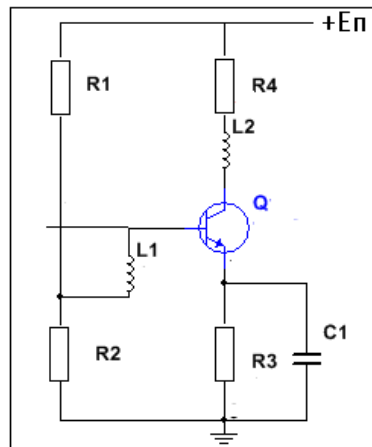
	0	1
0	"Параметр"	"Значение"
1	"Uк1 В"	15.647
2	"Uкmax В"	34.877
3	"Iк1 А"	0.383
4	"Iк0 А"	0.207
5	"Iкmax А"	1.132
6	"P0max Вт"	3.33
7	"КПД"	0.901
8	"RЭном Ом"	40.807
9	"θ, Град"	50

По сравнению с оптимальным углом отсечки КПД уменьшился на 3%.

Расчет энергетического режима ГВВ закончен.

## РАСЧЕТ ЦЕПЕЙ ПИТАНИЯ

Схема с автоматическим смещением в цепи эмиттера



Исходные данные для расчета содержатся в результатах расчета коллекторной и базовой цепей

$$E_k = 16.1 \quad E_n = 16.4 \quad E_b(f_n) = 0.233$$

$$I_{bo} = 2.089 \times 10^{-3}$$

$$I_{\theta o} = 0.209$$

$$I_{ko}(\theta) = 0.207 \quad R_{\text{Экном}}(\theta) = 40.807$$

1. Зададимся сопротивлением R4  $R_4 := 0.4$

Сопротивление R3 равно:  $R_3 := \frac{E_n - E_k - I_{ko}(\theta) \cdot R_4}{I_{\theta o}} = 1.04$

Если окажется, что  $R_4 < 0$ , то нужно уменьшить сопротивление R4. При этом обычно добиваются, чтобы выполнялось неравенство  $R_4 < R_3$

2. Задаем величину сопротивления R1 из условия  $R_1 < 0.1 E_n / I_{bo}$

$$0.1 \cdot \frac{E_n}{I_{bo}} = 785.002 \quad R_1 := 30$$

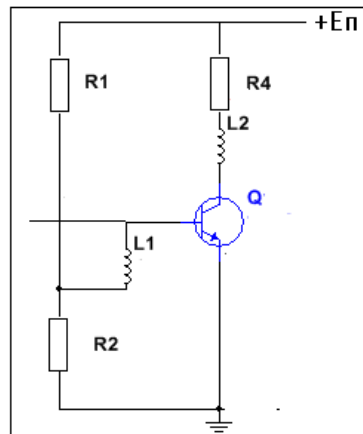
Сопротивление R2 равно

$$R_2 := R_1 \cdot \frac{I_{\theta o} \cdot R_3 + E_b(f_n)}{E_n - E_b(f_n) - I_{bo} \cdot R_1 - I_{\theta o} \cdot R_3} = 0.85$$

3. Блокировочные индуктивности задаются в соответствии с неравенствами  $\omega L_1 > 50 R_1$  и  $\omega L_2 > 50 R_{\text{Экном}}$

$$L_1 := \frac{60 \cdot R_1 \cdot R_2}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot (R_1 + R_2)} = 7.89 \times 10^{-6} \quad L_2 := \frac{60 \cdot R_{\text{Экном}}(\theta)}{2 \cdot \pi \cdot f_n} = 3.897 \times 10^{-4}$$

### Схема с фиксированным напряжением смещения



1. Сопротивление R4 равно:

$$R4 := \frac{Eп - Eк}{I_{ko}(\theta)} = 1.45$$

2. Задаемся величиной сопротивления R1 из условия  $R1 < 0.1 Eп / I_{bo}$

$$0.1 \cdot \frac{Eп}{I_{bo}} = 785.002 \quad R1 := 30$$

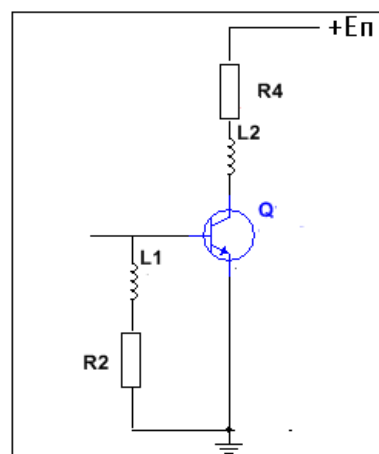
Сопротивление R2 равно

$$R2 := R1 \cdot \frac{I_{Эо} \cdot R3 + Eб(fн)}{Eп - Eб(fн) - I_{bo} \cdot R1} = 0.838$$

3. Блокировочные индуктивности задаются в соответствии с неравенствами  $\omega L1 > 50 R1$  и  $\omega L2 > 50 R_{Экном}$

$$L1 := \frac{60 \cdot R1 \cdot R2}{2 \cdot \pi \cdot fн \cdot (R1 + R2)} = 7.787 \times 10^{-6} \quad L2 := \frac{60 \cdot R_{Экном}(\theta)}{2 \cdot \pi \cdot fн} = 3.897 \times 10^{-4}$$

### Схема с автоматическим смещением в цепи базы



1. Сопротивление R2 обеспечивает автоматическое смещение и равно

$$R2 := \frac{Eб(fн)}{I_{bo}} = 111.382$$

2. Сопротивление R4 равно:

$$R4 := \frac{Eп - Eк}{I_{ko}(\theta)} = 1.45$$

3. Блокировочные индуктивности задаются в соответствии с неравенствами  $\omega L_1 > 50 R_1$  и  $\omega L_2 > 20 R_{Экном}$

$$L_1 := \frac{25 \cdot R_2}{2 \cdot \pi \cdot f_H} = 4.432 \times 10^{-4}$$

$$L_2 := \frac{25 \cdot R_{Экном}(\theta)}{2 \cdot \pi \cdot f_H} = 1.624 \times 10^{-4}$$

Разделительный и блокировочный конденсаторы:

$$C_{бл} := \frac{0.1}{(2 \cdot \pi \cdot f_H)} \cdot \frac{(R_1 + R_2)}{R_1 \cdot R_2} = 6.734 \times 10^{-10}$$

## 2.2 Порядок выполнения лабораторной работы

1. Рассчитайте энергетический режим транзисторного ГВВ, используя файл ЛР2.xmcd.

Расчет выполните для ГВВ на транзисторе Вашего варианта. Используйте параметры транзистора, полученные при выполнении лабораторной работы №1.

В качестве исходных используйте данные, заданные в программе расчета, за исключением полезной мощности. Этот параметр для конкретного транзистора надо подбирать опытным путем. Постепенно увеличивая мощность, следите за сообщением о допустимости значения коэффициента  $\xi$  использования коллекторного напряжения. При появлении сообщения

проверка\_ $\xi$  = "Уменьшите  $P_{ном}$  или увеличьте  $E_k$ "

нужно уменьшить мощность, добившись появления сообщения

проверка\_ $\xi$  = "Расчет можно продолжить"

При дальнейших расчетах может оказаться, что не выполняются ограничения на допустимые напряжения и токи. Поскольку в перечне параметров модели Гуммеля-Пуна нет данных о предельно допустимых значениях токов и напряжений, задайте значения допустимых параметров больше, чем полученные при расчете.

**Примечание.** Естественно, что при расчете схем реальных устройств произвольное задание предельных напряжений и токов недопустимо. Следует воспользоваться паспортными данными, представляемыми производителем транзистора.

2. Анализ результатов расчета сводится к проверке изменения коэффициента усиления по мощности в зависимости от рабочей частоты. Желательно, чтобы изменение не превышало 20%. Если изменении больше, то сформулируйте свои рекомендации по стабилизации коэффициента усиления.

## 2.3 Содержание отчета по лабораторной работе

1. Цель работы.
2. Задание на выполнение.
3. Результаты расчета ГВВ и их анализ.

#### 4. Принципиальная схема ГВВ.

К отчету прилагается файл программы расчета.

### **2.4 Контрольные вопросы**

1. Дайте определение генератора с внешним возбуждением.
2. Какие электронные приборы применяются в ГВВ?
3. Дайте определения недонапряженного, граничного и перенапряженного режимов.
4. Что такое коэффициент использования коллекторного напряжения?
5. В каком режиме коэффициент использования коллекторного напряжения больше: в недонапряженном или в перенапряженном?
6. Перечислите способы изменения сопротивления нагрузки ГВВ резонансным контуром.

## Лабораторная работа 3. Исследование базовой и коллекторной цепей транзисторного ГВВ

### Цель работы

- анализ формы импульсов токов и напряжений в схеме ГВВ;
- анализ режимов работы ГВВ с резистивной и резонансной нагрузкой.

### Содержание работы

1. Исследование базовой цепи. Анализ зависимости токов и напряжений от частоты входного сигнала.
2. Исследование коллекторной цепи ГВВ с резистивной нагрузкой. Анализ зависимости напряженности режима от амплитуды напряжения возбуждения.
3. Исследование коллекторной цепи ГВВ с резонансной нагрузкой. Анализ зависимости напряженности режима от амплитуды напряжения возбуждения.

## 3.1 Теоретические сведения

### 3.1.1 Входная (базовая) цепь транзистора

Основные показатели генератора с внешним возбуждением - мощность, коэффициент полезного действия, коэффициент усиления по мощности и др. зависят от формы токов и напряжений в схеме генератора. От формы импульсов тока зависит их спектр. С точки зрения максимизации КПД важно знать соотношение амплитуды первой гармоники тока и постоянной составляющей. Процессы, протекающие в базовой и коллекторной цепях, взаимосвязаны. Но с методической точки зрения их удобнее изучать в отдельности. Поэтому рассмотрим, сначала входную цепь транзистора без учета реакции коллекторной цепи.

Сопротивление эмиттерного перехода мощных транзисторов, как в открытом, так и в закрытом состоянии оказывается значительно меньше, чем внутреннее сопротивление эквивалентного источника – выходного сопротивления предыдущего каскада. Поэтому можно считать, что возбуждение транзистора осуществляется генератором тока в частности генератором гармонического сигнала  $i_e(\omega t) = I_e \sin \omega t$ .

Из-за нелинейности входного сопротивления транзистора при переходе его из состояния отсечки в активное состояние и обратно, напряжение на эмиттерном переходе (а также между выводами эмиттера и базы) оказывается негармоническим.

Определим формы токов и напряжений в транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером (ОЭ) при возбуждении гармоническим током. Эквивалентная схема входной цепи изображена на рис. 3.1.

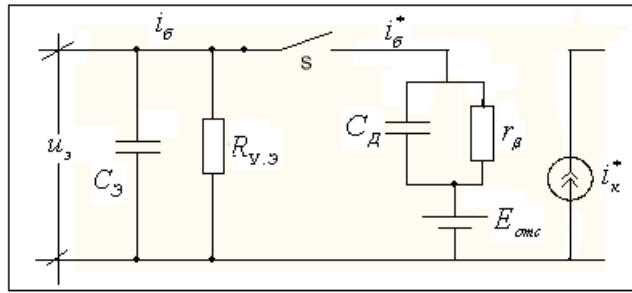


Рис. 3.1. Эквивалентная схема базовой цепи.  $u_э$  - напряжение база-эмиттер;  $C_э$  - барьерная ёмкость;  $R_{у.э}$  - сопротивление утечки;  $i_б$  - входной ток;  $i_б^*$  - ток эмиттерного перехода;  $S$  - ключ, имитирующий отпирание и запираание эмиттерного перехода;  $C_д$  диффузионная ёмкость;  $r_β$  сопротивление рекомбинации;  $E_{отс}$  - напряжение отсечки;  $i_к^*$  - ток коллекторного перехода.

При напряжении  $u_э(\omega t) < E_{отс}$  эмиттерный переход закрыт и сопротивление входной цепи транзистора определяется параллельным соединением сопротивления утечки  $R_{у.э}$  и барьерной ёмкости  $C_э$ , постоянная времени которых равна  $\tau_{закр} = R_{у.э}C_э$ .

В течение другой части периода эмиттерный переход открыт, напряжение на эмиттерном переходе  $u_э(\omega t) = E_{отс}$  и вход цепь транзистора определяется параллельным соединением сопротивления  $r_β$  и диффузионной ёмкости  $C_д$  с постоянной времени  $\tau_{откр} = r_βC_д \ll \tau_{закр}$ .

Временные зависимости токов и напряжений приведены на рис. 3.2.

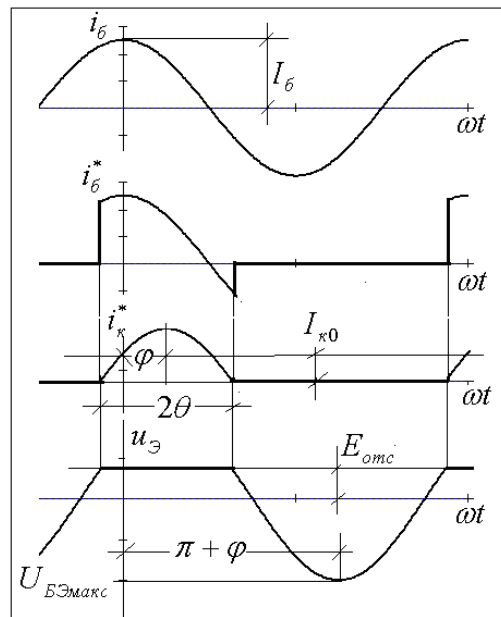


Рис. 3.2

Входное сопротивление базовой цепи комплексное, зависит от частоты, поэтому и форма импульсов базового и коллекторного токов тоже зависит от частоты входного сиг-



нала. В диапазоне очень низких частот ( $\omega < 0.3/\tau_{закр}$ ) можно пренебречь влиянием емкостей  $C_{э}$ ,  $C_{д}$  и представить транзистор эквивалентной схемой, приведенной на рис. 3.3.

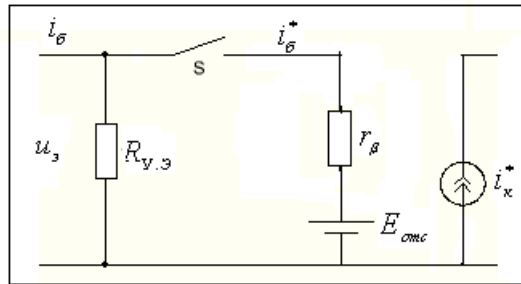


Рис. 3.3.

При  $u_э(\omega t) \geq E_{отс}$  эмиттерный переход открыт (ключ  $S$  замкнут) ток  $i_б^*(\omega t) = i_б(\omega t)$ , а ток коллектора в  $\beta_0$  раз больше базового. Импульсы токов имеют вид отрезков косинусоиды с углом отсечки  $\theta$  (см. рис. 3.4).

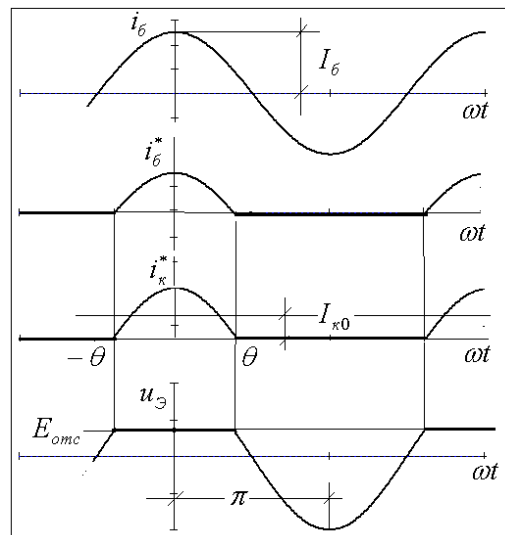


Рис. 3.4

При  $u_э(\omega t) < E_{отс}$  эмиттерный переход открыт (ключ  $S$  разомкнут). Базовый и коллекторный токи равны нулю. Входной ток протекает через сопротивление утечки  $R_{в.э}$  и создает напряжение на закрытом эмиттерном переходе в виде симметричных косинусоидальных импульсов.

На высоких частотах ( $\omega > 3/\tau_{откр} = 3\omega_\beta$ )<sup>1</sup> можно пренебречь влиянием сопротивлений  $R_{у.э}$  и  $r_\beta$ , считая сопротивление эмиттерного в закрытом и открытом состояниях емкостным. Эквивалентная схема входной цепи для этого случая изображена на рис. 3.5.

Входной ток  $i_\theta(\omega t)$  будет поочередно протекать через  $C_\Delta$  (при замкнутом ключе) или через  $C_\Sigma$  (при разомкнутом). Эпюры токов и напряжений изображены на рис. 3.6.

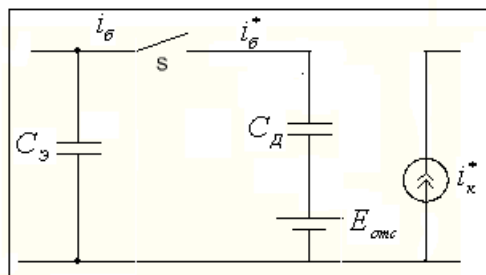


Рис. 3.5

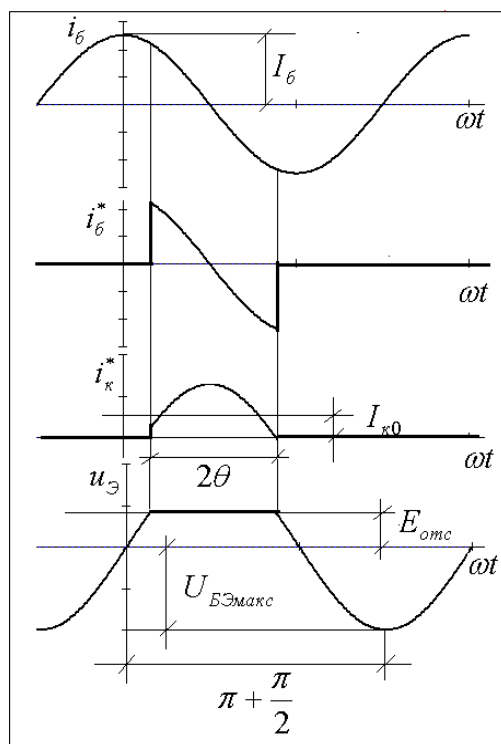


Рис. 3.6

На низких и средних частотах  $0.3/\tau_{закр} < \omega < 3/\tau_{откр}$  из-за неравенства постоянных времени закрытого и открытого переходов, при переходах транзистора из состояния отсечки в активное состояние и обратно, появляются переходные процессы. В результате

<sup>1</sup>  $\omega_\beta$  - это частота, при которой модуль коэффициента передачи по току в схеме с ОЭ равен  $\beta_0/\sqrt{2}$ , где  $\beta_0$  - коэффициент передачи по постоянному току.

импульсы тока  $i_k^*$  и напряжения эмиттера  $u_e$  становятся несимметричными. При расчетах вводятся поправочные коэффициенты, учитывающие влияние искажения формы импульсов тока

В широкополосных двухтактных генераторах при работе транзисторов с углом отсечки  $\theta = 90$  важно, чтобы в импульсах тока  $i_k^*$  перекосов не было, так как в этом случае в них отсутствуют нечетные гармоники ( $3\omega, 5\omega, \dots$ ). Устранение перекосов в импульсах коллекторного тока и эмиттерного напряжения включением шунтирующего добавочного сопротивления  $R_d$  между выводами базы и эмиттера транзистора. Сопротивление  $R_d$  выбирают так, чтобы выровнять постоянные времени эмиттерного перехода в открытом и закрытом состоянии.

На средних и высоких частотах из-за инерционности транзистора, обусловленной ёмкостями  $C_e$  и  $C_d$ , между входным током  $i_e(\omega t)$  и напряжением эмиттера возникает фазовый сдвиг  $\varphi = \arctg \omega / \omega_\beta$ . Измерив величину фазового сдвига на частоте  $\omega$ , можно оценить частоту  $\omega_\beta$ . Появление фазового сдвига вызывает увеличение тока базы и, следовательно, уменьшение коэффициента усиления.

### 3.1.2 Выходная (коллекторная) цепь транзистора

Форма импульсов напряжения на коллекторе  $u_k(\omega t)$  зависят от напряженности режима и вида коллекторной нагрузки.

Рассмотрим различные режимы работы генератора с резистивной нагрузкой (рис. 3.7). Такая схема широко используемой в сравнительно маломощных усилителях и импульсных устройствах. На рис. 3.8 даны эпюры коллекторного напряжения  $u_k(\omega t)$ , и коллекторного тока  $i_k(\omega t)$  в недонапряженном режиме работы.

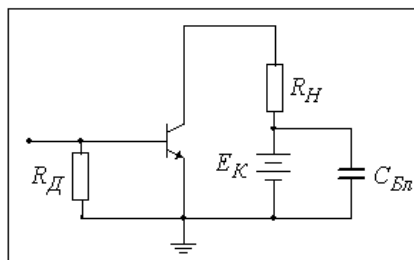


Рис. 3.7. Схема генератора с резистивной нагрузкой.  $R_d$  - сопротивление делителя в цепи базы;  $E_K$  - источника коллекторного напряжения;  $R_H$  сопротивление нагрузки;  $C_{Бл}$  - блокировочный конденсатор.

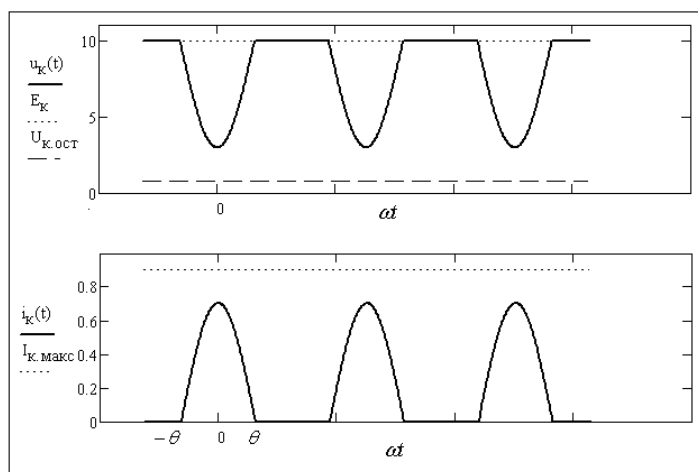


Рис. 3.8

Ток коллектора изменяется по косинусоидальному закону. Следовательно, и напряжение коллектора представляет собой отрезки косинусоид. Минимальное значение коллекторного напряжения больше остаточного  $U_{K.ост}$ , равного напряжению насыщения. Наибольшее значение коллекторного тока меньше максимально возможного  $I_{K.макс}$ .

При увеличении амплитуды напряжения возбуждения напряженность режима работы возрастает. Транзистор переходит в *граничный* режим (рис. 3.9).

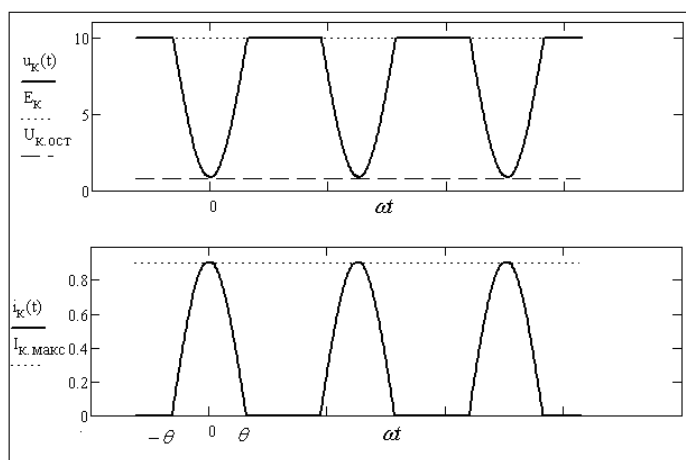


Рис. 3.9

В этом режиме  $\min u_K = U_{K.ост}$  и  $\max i_K = I_{K.макс}$ . Импульсы тока и напряжения, как и в недонапряженном режиме, представляют собой отрезки косинусоид.

При дальнейшем увеличении амплитуды напряжения возбуждения транзистор переходит в *перенапряженный* режим (рис. 3.10).

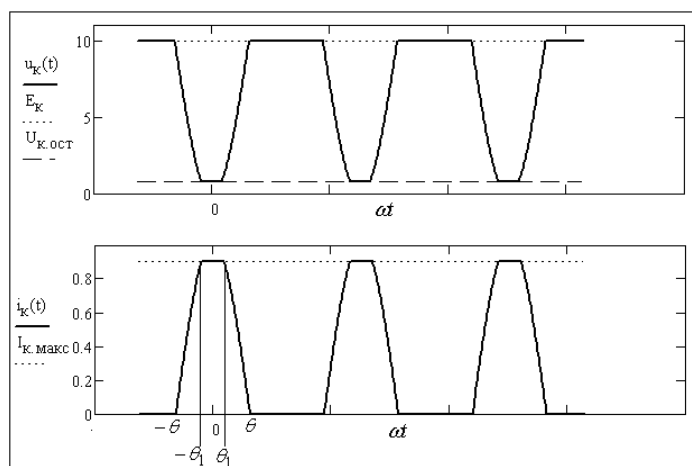


Рис. 3.10.

По-прежнему  $\min u_K = U_{K.OCT}$  и  $\max i_K = I_{K.MAKC}$ . Но кроме угла отсечки  $\theta$ , обусловленного запирающим транзистором, появился угол отсечки  $\theta_1$ , вызванный переходом транзистора в режим насыщения.

Наконец, при очень большой амплитуде напряжения возбуждения транзистор переходит в *ключевой режим* работы, который является предельным для перенапряженного режима. Транзистор поочередно находится в состоянии насыщения и отсечки (рис. 3.11).

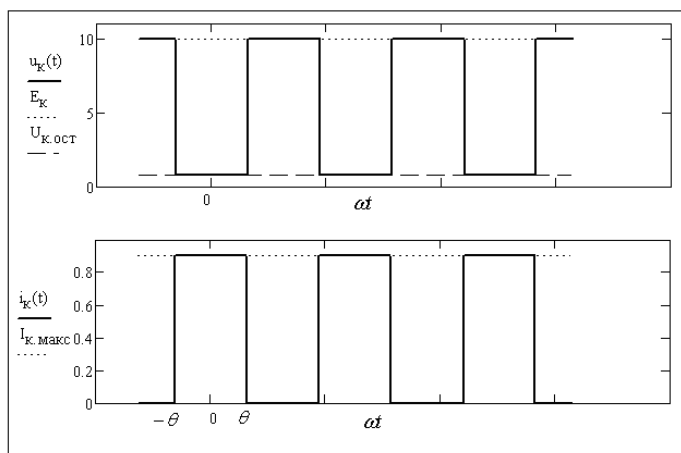


Рис. 3.11

В генераторе с *резонансной нагрузкой* форма токов и напряжений существенно отличается от рассмотренных выше.

На рис. 3.12 показана простейшая схем генератора с параллельным  $LC$ -контуром и сопротивлением нагрузки  $R_H$ .

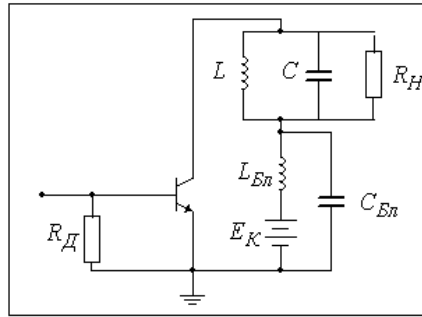


Рис. 3.12. Схема генератора с резонансной нагрузкой.  $R_D$  - сопротивление делителя в цепи базы;  $E_K$  - источника коллекторного напряжения;  $R_H$  сопротивление нагрузки;  $C_{БЛ}$  - блокировочный конденсатор;  $L_{БЛ}$  блокировочная катушка индуктивности;  $L, C$  - индуктивность и ёмкость контура.

Рассмотрим работу генератора в случае, когда контур настроен в резонанс на частоту возбуждения  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$  и имеет высокую добротность  $Q_H = R_H / \rho \gg 1$ , где  $\rho$  - характеристическое сопротивление контура,  $\rho = \sqrt{L/C} = \omega_0 L = 1/\omega_0 C$ .

В *недонапряженном* режиме коллекторный ток определяется формой и амплитудой входного тока и его можно считать близким к отрезкам симметричных косинусоидальных импульсов с углом отсечки  $\theta$  (рис. 3.13).

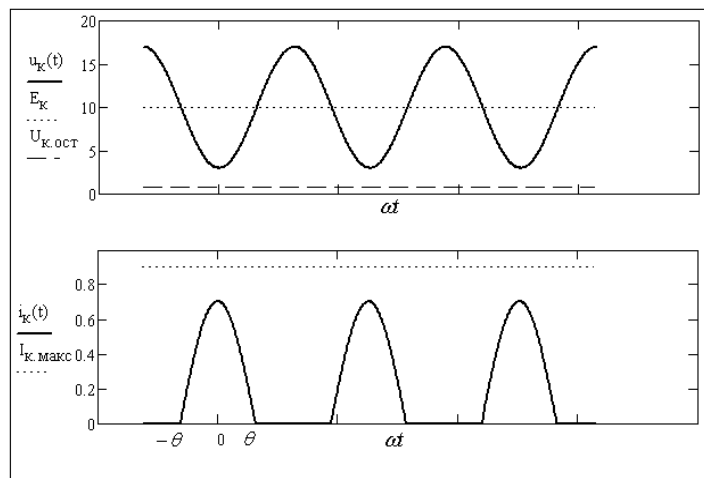


Рис. 3.13

Благодаря фильтрующим свойствам контура и настройке его в резонанс, форма напряжения на коллекторе близка к гармонической.

При увеличении амплитуды входного тока (вызванного увеличением напряжения на эмиттере), наступает *граничный* режим, при котором  $\min u_K = U_{K.ОСТ}$  и  $\max i_K = I_{K.МАКС}$  (рис. 3.14).

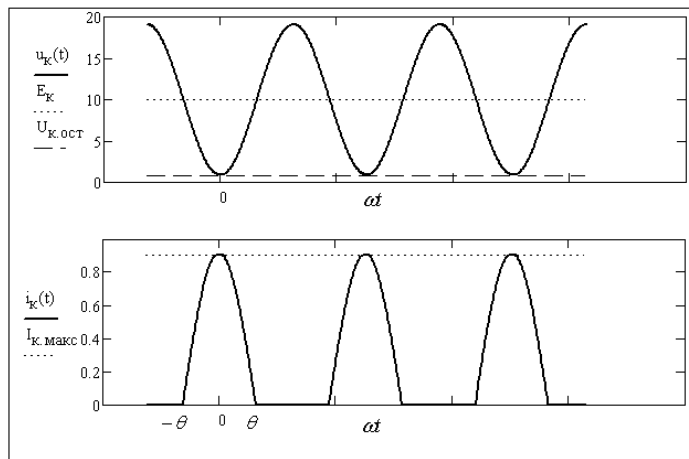


Рис. 3.14

Дальнейшее увеличение амплитуды возбуждения переводит транзистор в *перенасыщенный* режим. На этапе насыщения  $LC$ -контур шунтируется сопротивлением насыщения  $r_{нас}$ . Форма тока и напряжения зависит от того, насколько значительно это шунтирование. Степень шунтирования оценивается величиной добротности контура в режиме насыщения  $Q_{нас} = r_{нас} / \rho$ .

При  $Q_{нас} < 1$ , что специфично для современных мощных генераторных транзисторов, на интервале от  $-\theta_1$  до  $\theta_1$  контур шунтируется малым сопротивлением  $r_{нас}$ . В результате напряжение на коллекторе уплощается и остается практически неизменным и равным  $U_{K.ост}$  (рис. 3.15).

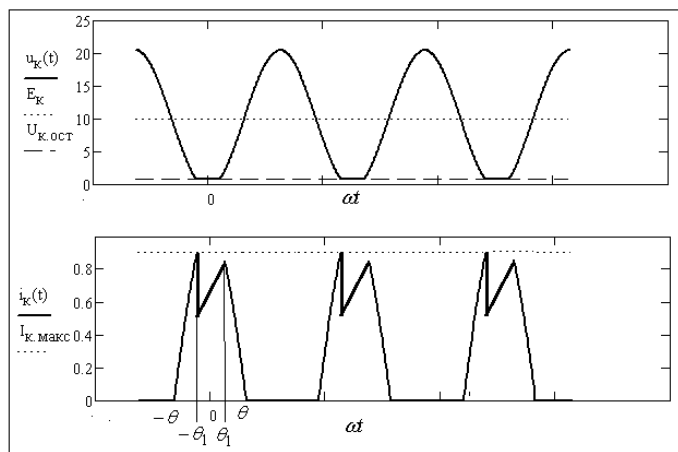


Рис. 3.15

В импульсе коллекторного тока появляется провал, обусловленный переходным процессом, возникающим в индуктивности контура.

## 3.2 Порядок выполнения лабораторной работы

### 1 Подготовка схемы виртуального макета ГВВ:

- запустите программу NI Multisim 12;

- откройте файл ЛР3\_1.ms10 (рис. 3.16).

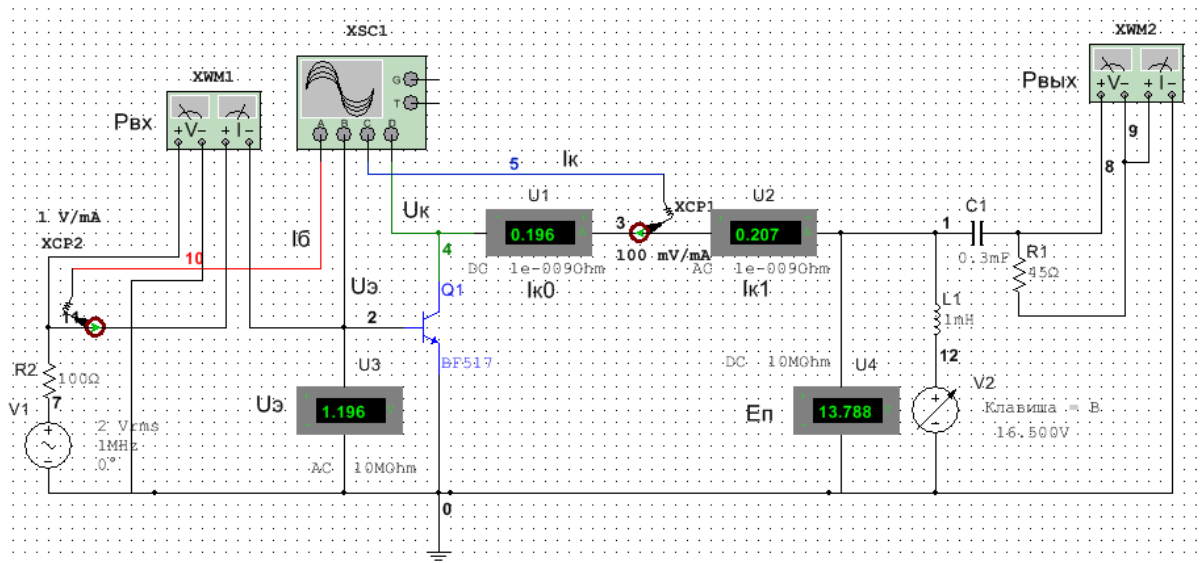


Рис. 3.16

К схеме подключены измерительные приборы:

- XWM1 - измеритель мощности входного сигнала (мощность возбуждения);
- XSC1 - четырехканальный осциллограф: канал А - ток базы; канал В -напряжение база-эмиттер; канал С - ток коллектора; канал D - напряжение коллектор-эмиттер;
- XWM2 - измеритель мощности выходного сигнала (мощность в нагрузке);
- XCP1 – датчик коллекторного тока с коэффициентом трансформации 100 mV/mA;
- XCP1 – датчик тока базы с коэффициентом трансформации 1V/mA;
- U1 - амперметр, измеряющий постоянную составляющую коллекторного тока;
- U2 - амперметр для измерения переменной составляющей коллекторного тока;
- U3 - вольтметр, измеряющий переменную составляющую напряжения на эмиттерном переходе;
- U4 - вольтметр, измеряющий напряжение коллекторного питания;
- V1 - генератор суммы напряжений входного сигнала и напряжения смещения;
- V2 - регулируемый источник постоянного напряжения.

**Примечание.** При измерении переменного напряжения или тока (режим AC) приборы показывают среднее квадратическое значение измеряемого параметра RMS, которое вычисляется по формуле

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

где  $\bar{x}$  - среднее значение или постоянная составляющая. Следовательно, RMS - это действующее значение переменной составляющей. Амплитуда синусоидального сигнала в  $\sqrt{2}$  раз больше, чем RMS.

Удалите из схемы транзистор BF 517 и на его место подключите транзистор Вашего варианта.



## 2 Исследование базовой цепи. Анализ зависимости токов и напряжений от частоты входного сигнала.

Установите частоту генератора V1 равной 100 кГц.

Включите процесс моделирования.

Включите и настройте осциллограф. Осциллограммы токов и напряжений должны иметь примерно такой вид, как изображено на рис. 3.17. Сравните с теоретическими эпюрами токов и напряжений на низких частотах ([рис. 3.4](#)). Скопируйте осциллограмму для последующего включения в отчет по лабораторной работе.

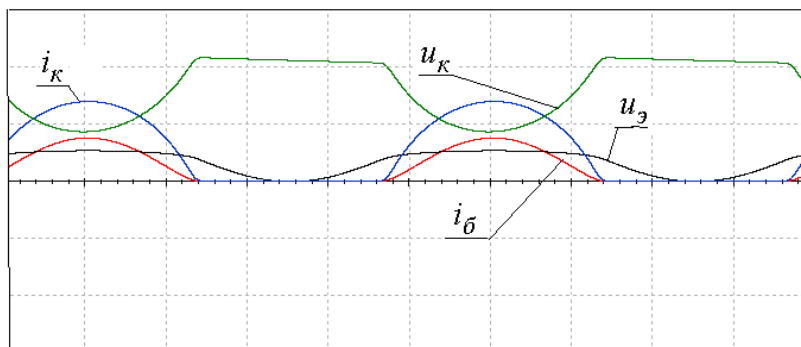


Рис. 3.17

Запишите показания приборов в табл. 1

Таблица 1

Частота сигнала, МГц	Мощность возбуждения $P_{вх}$ , Вт	Мощность в нагрузке $P_{вых}$ , Вт	Коэффициент усиления по мощности $K_p = P_{вых} / P_{вх}$	Задержка коллекторного тока $\varphi$ , град.	Примечание
0.1					$E_n =$ $E_{\phi} =$ $U_{\phi} =$ $R1 =$
1					
10					
20					
...					

Повторите измерения на частотах, указанных в таблице. Занесите результаты в таблицу и копируйте осциллограммы. Сравните их с теоретическими: для средних частот [рис. 3.2](#), для высоких частот – [рис. 3.6](#).

Значение «высокой» частоты установите опытным путем, постепенно увеличивая частоту возбуждения, до тех пор, пока осциллограммы не примут вид, близкий к теоретическому. Для транзистора BF 517 эта частота примерно равна 50 МГц (см. рис. 3.18).

По осциллограммам измерьте фазовую задержку  $\varphi$  тока коллектора относительно тока базы, а так же угол отсечки  $\theta$  коллекторного тока (рис. 3.18).

**Примечание.** В процессе измерений поддерживайте неизменным напряжение на эмиттерном переходе (показания вольтметра  $U_3$ ) путем соответствующего корректировки напряжения RSM источника V1.

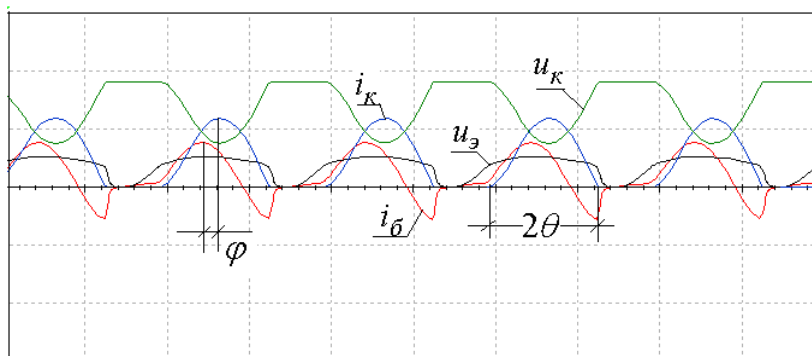


Рис. 3.18

При оформлении отчета постройте графики зависимостей мощностей, коэффициента усиления и фазовой задержки от частоты напряжения возбуждения.

### 3 Исследование коллекторной цепи ГВВ с резистивной нагрузкой. Анализ зависимости напряженности режима от амплитуды напряжения возбуждения.

Изменяя величину напряжения возбуждения (источник V1), измерьте постоянную составляющую коллекторного тока, выходную и выходную мощности и рассчитайте потребляемую мощность  $P_0$ , коэффициент усиления по мощности  $K_p$  и коэффициент полезного действия  $\eta$  по формулам:

$$P_0 = I_{k0} E_n, \quad K_p = P_{вых} / P_{вх}, \quad \eta = P_{вых} / P_0.$$

Результаты запишите в табл. 2.

Таблица 2

Напряжение возбуждения $U_э$ , В (RSM)	Постоянная составляющая коллекторного тока $I_{k0}$ , А	Мощность возбуждения $P_{вх}$ , Вт	Выходная мощность $P_{вых}$ , Вт	Потребляемая мощность $P_0 = I_{k0} E_n$ , Вт	КПД	Коэффициент усиления по мощности $K_p = P_{вых} / P_{вх}$	Примечание
0.25							$E_n =$ $E_э =$ $R_l =$ $F = 1$ МГц
0.45							
0.65							
....							

Максимальное напряжение возбуждения подберите так, чтобы каскад перешел в ключевой режим. Для ГВВ на транзисторе BF 517 ключевой режим наступает при  $U_э > 2B$ . Осциллограммы ключевого режима приведены на рис. 3.19.

#### 4 Исследование коллекторной цепи ГВВ с резонансной нагрузкой. Анализ зависи-

мости напряженности режима от амплитуды напряжения возбуждения.

Схема отличается от приведенной на [рис. 3.16](#) тем, что в цепи коллектора включен параллельный колебательный контур C2, L2 с сопротивлением потерь R3. Изменяя это сопротивление можно изменять эквивалентное сопротивление контура. Контур настроен на частоту напряжения возбуждения  $F=1$  МГц.

В ГВВ на транзисторе DF 517 перенапряженный режим наступает при  $U_g > 1.5B$  (см. рис. 3.21).

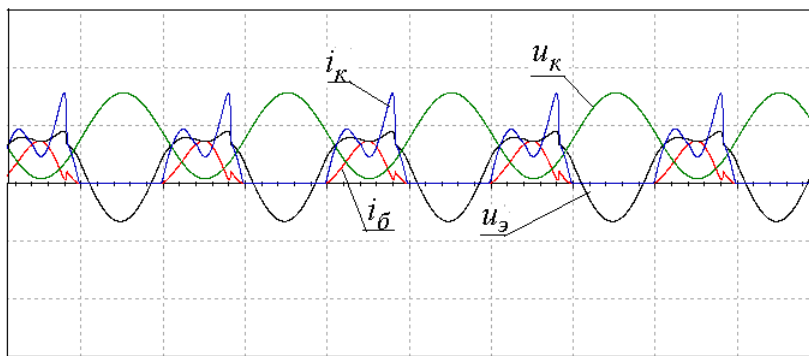


Рис. 3.21

### 3.3 Содержание отчета по лабораторной работе

#### 1 Цель работы.

#### 2 Задание на выполнение.

3 Исследование базовой цепи. Анализ зависимости токов и напряжений от частоты входного сигнала.

Привести таблицу результатов измерения. По данным таблицы построить графики. Привести осциллограммы токов и напряжений для низких, средних и высоких частот напряжения возбуждения. Сделать качественные выводы о частотных свойствах транзистора.

4 Исследование коллекторной цепи ГВВ с резистивной нагрузкой. Анализ зависимости напряженности режима от амплитуды напряжения возбуждения.

По результатам измерений построить графики. На графиках указать напряженность режима работы транзистора. Привести осциллограммы токов и напряжений для четырех режимов работы. Сделать выводы о преимуществах и недостатках недонапряженного, граничного перенапряженного и ключевого режимов.

5 Исследование коллекторной цепи ГВВ с резонансной нагрузкой. Анализ зависимости напряженности режима от амплитуды напряжения возбуждения.

Провести сравнительный анализ осциллограмм токов и напряжений в различных режимах при резонансной и резистивной нагрузках.

Отчет по лабораторной работе оформляется в текстовом редакторе Word. К отчету прилагается файл электронной Excel с таблицами экспериментальных данных и построенными по этим данным графиками. в котором

### 3.4 Контрольные вопросы

1. От каких параметров эквивалентной схемы транзистора в основном зависят его частотные свойства?

2. Как изменяется фазовый сдвиг между токами коллектора и базы при увеличении частоты напряжения возбуждения?
3. Почему с ростом частоты напряжения возбуждения уменьшается коэффициент усиления ГВВ по мощности?
4. Как классифицируются режимы работы транзистора по напряженности?
5. Опишите, чем отличаются осциллограммы токов и напряжений ГВВ, снятые при различных режимах работы?
6. В каком режиме КПД генератора имеет наибольшее значение?
7. В чем принципиальное отличие осциллограмм токов и напряжения ГВВ с резистивной нагрузкой от ГВВ с резонансной нагрузкой?

## Лабораторная работа 4. Исследование характеристик транзисторного ГВВ

### Цель работы

- исследование нагрузочных характеристик ГВВ;
- анализ влияния питающих напряжений на режим работы ГВВ и его параметры;
- исследование настроечной характеристики ГВВ.

### Содержание работы

- 1 Построение нагрузочных характеристик ГВВ с резистивной нагрузкой.
- 2 Исследование настроечных характеристик ГВВ резонансной нагрузкой.
- 3 Исследование зависимостей параметров ГВВ от напряжения возбуждения.

## 4.1 Теоретические сведения

### 4.1.1 Нагрузочные характеристики ГВВ

*Нагрузочными характеристиками* генератора с внешним возбуждением называются зависимости токов, напряжений и мощностей от величины сопротивления коллекторной нагрузки  $R_k$ :  $U_{mk}$ ,  $I_{k0}$ ,  $I_{k1}$ ,  $P_0$ ,  $P_1$ ,  $P_k$ .

Эти зависимости можно оценить качественно, полагая, что составляющие коллекторного тока зависят от сопротивления нагрузки линейно. Комплекс MS12 позволяет построить эти зависимости по результатам моделирования. Рассмотрим оба подхода.

Поскольку мощность пропорциональна произведению тока на напряжение, вначале необходимо построить зависимости токов  $I_{k0}$ ,  $I_{k1}$  и напряжения  $U_{mk}$  от величины эквивалентного сопротивления нагрузки в коллекторной цепи  $R_k$ .

При малых сопротивлениях нагрузки каскад находится в недонапряженном режиме (НР), токи слабо изменяются с изменением нагрузки, а переменное напряжение с увеличением  $R_k$  возрастает (рис. 4.1, а). Это объясняется изменением формы импульсов коллекторного тока – с ростом  $R_k$  их амплитуда постепенно уменьшается (рис. 4.1, б) и, следовательно, уменьшаются составляющие токов. Напряжение  $U_{mk}$  растет, поскольку ток  $I_{k1}$  уменьшается медленнее, чем растет сопротивление  $R_k$ .

При  $R_k > R_{кр}$  каскад переходит в перенапряженный (ПР) режим, где с увеличением сопротивления нагрузки амплитуда импульсов коллекторного тока продолжает уменьшаться и в импульсах появляется провал (рис. 4.1, б), что приводит к быстрому уменьшению составляющих коллекторного тока. Амплитуда переменного напряжения от нагрузки зависит слабо.

Результаты моделирования в среде MS12 практически совпадают с зависимостями, базирующимися на качественных, упрощенных представлениях (ср. рис 4.1, а и 4.1, в).

Принципиальное отличие видно лишь в форме импульсов коллекторного тока в перенапряженном режиме – в импульсе тока нет провала (рис. 4.1 г). Это объясняется тем, что моделировалась работа ГВВ с резистивной нагрузкой, при которой в напряжении на сопротивлении нагрузки сохраняются все спектральные составляющие. При резонансной нагрузке высшие гармоники отфильтровываются, напряжение гармоническое и это приводит к появлению провала в импульсе тока. (См результаты лабораторной работы № 3).

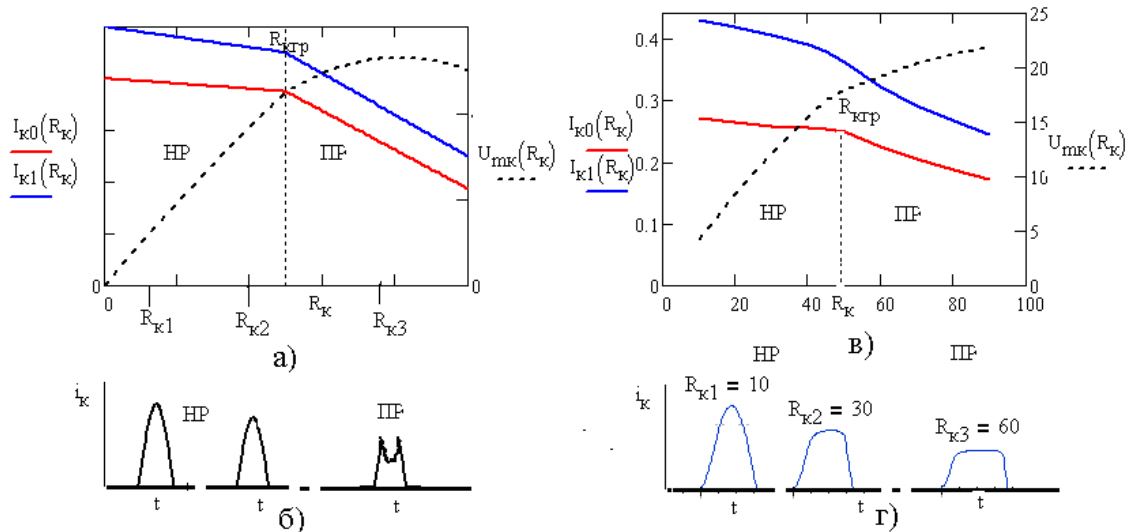


Рис. 4.1 Нагрузочные характеристики генератора с внешним возбуждением: а — качественные зависимости амплитуды переменного напряжения на коллекторе  $U_{mk}(R_k)$ , амплитуды первой гармоники  $I_{k1}(R_k)$  и постоянной составляющей  $I_{k0}(R_k)$  коллекторного тока от сопротивления коллекторной нагрузки  $R_k$ ; б — импульсы коллекторного тока при различных сопротивлениях нагрузки; в — экспериментальные зависимости амплитуды переменного напряжения на коллекторе  $U_{mk}(R_k)$ , амплитуды первой гармоники  $I_{k1}(R_k)$  и постоянной составляющей  $I_{k0}(R_k)$  коллекторного тока; г — импульсы коллекторного тока при различных сопротивлениях нагрузки, полученные при моделировании в MS12.

Зная зависимости токов и напряжения, можно найти мощности.

Полезная мощность равна  $P_{k1} = 0.5U_{mk}I_{k1}$  и принимает максимальное значение в граничном режиме (рис. 4.2, а). Результаты моделирования это подтверждают (рис. 4.2,б). Граничный режим является оптимальным, а сопротивление коллекторной нагрузки, соответствующее этому режиму, называют оптимальным сопротивлением  $R_{опт}$ . Мощность  $P_0$ , потребляемая коллекторной цепью от источника питания, равна произведению постоянной составляющей коллекторного тока  $I_{k0}$  на величину напряжения коллекторного питания  $E_k$ :  $P_0 = E_k I_{k0}$ . Величина  $E_k$  от  $R_k$  не зависит, а  $I_{k0}$  при изменении сопротивления коллекторной нагрузки ведет себя аналогично  $I_{k1}$ . Вследствие этого в недонапряженном режиме потребляемая мощность изменяется незначительно, а в перенапряженном быстро

падает (рис. 4.2). Моделирование и качественные построения зависимостей мощностей от  $R_k$  практически совпадают (ср. рис. 4.2, а и 4.2, б).

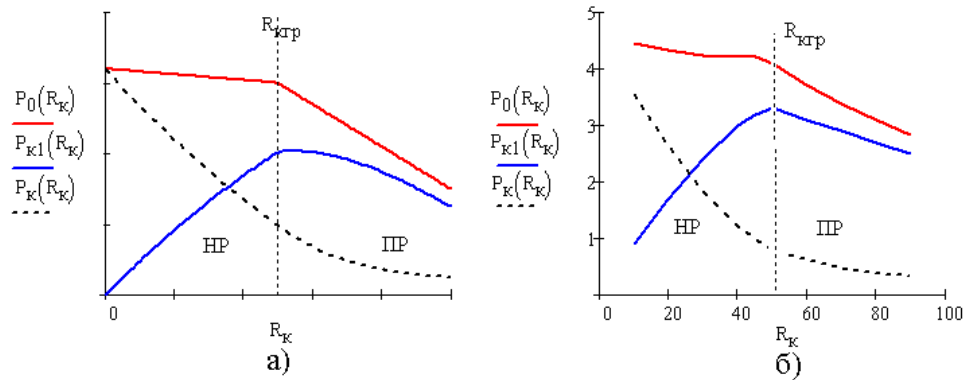


Рис. 4.2 Нагрузочные характеристики генератора с внешним возбуждением: а — качественные зависимости потребляемой мощности  $P_0(R_k)$ , мощности первой гармоники  $P_{k1}(R_k)$  и мощности, рассеиваемой на коллекторе  $P_k(R_k)$  от сопротивления коллекторной нагрузки  $R_k$ ; б — экспериментальные зависимости потребляемой мощности  $P_0(R_k)$ , мощности первой гармоники  $P_{k1}(R_k)$  и мощности, рассеиваемой на коллекторе  $P_k(R_k)$ .

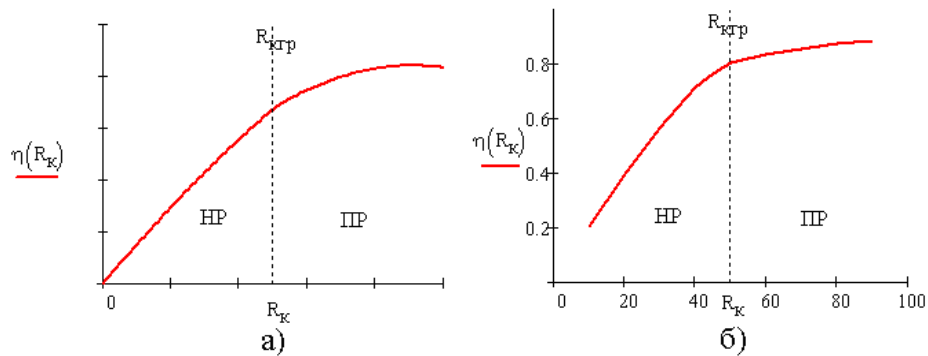


Рис. 4.3 Нагрузочные характеристики генератора с внешним возбуждением: а — качественная зависимость электронного КПД  $\eta(R_k)$  от сопротивления коллекторной нагрузки  $R_k$ ; б — экспериментальная зависимость электронного КПД  $\eta(R_k)$ .

Коэффициент полезного действия в перенапряженном режиме изменяется незначительно, так как вместе с потребляемой уменьшается и полезная мощность (рис. 4.3).

#### 4.1.2 Настроечные характеристики ГВВ

**Настроечными характеристиками** генератора с внешним возбуждением называются зависимости токов и напряжений от изменения частоты настройки колебательного контура в коллекторной цепи транзистора, например, при изменении емкости конденсатора  $C_k$  (рис. 4.5). Эквивалентное сопротивление контура содержит как активную, так и реактивную составляющие (рис. 4.4):

$$Z_{\text{э}}(f) = R_{\text{э}}(f) + jX_{\text{э}}(f)$$



где  $R_{\vartheta}(f) = R_{рез}/(1+a^2)$ ,  $X_{\vartheta}(f) = -aR_{рез}/(1+a^2)$ ,  $a = 2Q(f - f_0)/f_0$  обобщенная расстройка,  $Q$  - добротность,  $f$  - частота напряжения возбуждения,  $f_0$  - резонансная частота контура.

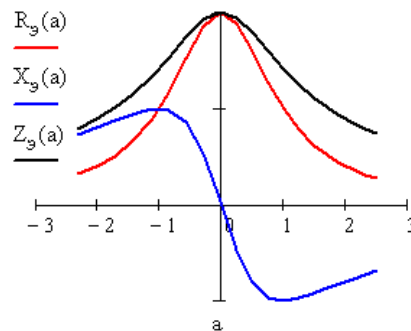


Рис. 4.4

При расстройке контура уменьшается эквивалентное сопротивление контура  $Z_{\vartheta}$  и амплитуда переменного напряжения на коллекторе  $U_{мк} = I_{к1}|Z_{\vartheta}|$ . Напряжение на коллекторе сдвигается по фазе относительно коллекторного тока на угол  $\varphi(f) = \arctg X_{\vartheta}(f)/R_{\vartheta}(f)$ . В результате падает полезная мощность  $P_{к1} = U_{мк}I_{к1}\cos\varphi$ . Провал в импульсе коллекторного тока в перенапряженном режиме становится несимметричным (рис. 4.5).

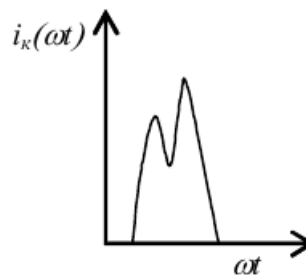


Рис. 4.5 Форма импульса коллекторного тока в перенапряженном режиме при расстройке контура

При больших расстройках сопротивление  $|Z_{\vartheta}|$  мало, режим недонапряженный, постоянная составляющие коллекторного тока  $I_{к0}$ ,  $I_{к1}$  имеют большое значение. По мере приближения к резонансу сопротивление контура увеличивается, транзистор переходит в граничный или [перенапряженный режим](#). Составляющие коллекторного тока при резонансе достигает минимального значения. Это свойство можно использовать для настройки контура в резонанс по показаниям амперметра, включенного в цепь протекания постоянной составляющей коллекторного тока (рис. 4.6).

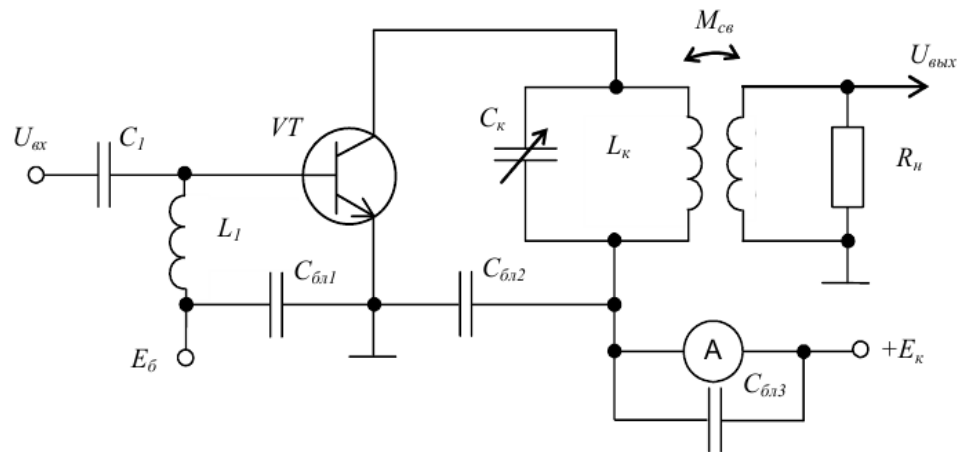


Рис. 4.6 Схема настройки контура в резонанс по показаниям амперметра в коллекторной цепи

Одновременно с изменением коллекторного тока изменяется и полезная мощность  $P_{к1}$ , которая принимает максимальное значение при настройке контура в резонанс, если при этом ГВВ переходит в граничный режим (рис. 4.7).

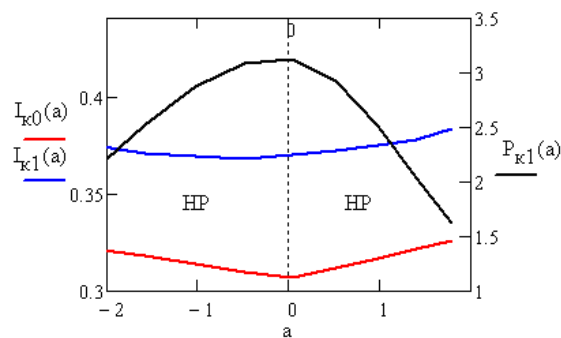


Рис. 4.7

#### 4.1.3 Влияние питающих напряжений на режим ГВВ

**Влияние амплитуды напряжения возбуждения  $U_{мб}$ .** Зависимости амплитуды первой гармоники коллекторного тока  $I_{к1}$  от напряжения возбуждения при фиксированных значениях смещения на базе  $E_6 = \text{const}$  называются **колебательными характеристиками**. Чтобы исключить влияние изменения угла отсечки, зададим напряжение смещение равным напряжению отсечки:  $E_6 = E_{отс}$ . Тогда угол отсечки коллекторного тока равен 90 градусов и не зависит от амплитуды переменного напряжения на входе. При малых амплитудах каскад находится в недонапряженном режиме, составляющие коллекторного тока  $I_{к0}$  и  $I_{к1}$  нарастают почти линейно до тех пор, пока не наступит граничный режим. С переходом в перенапряженный режим токи уменьшаются или растут медленнее (рис. 4.8). Линейно нарастающий участок этой характеристики в перенапряженном режиме используют при усилении модулированных колебаний.

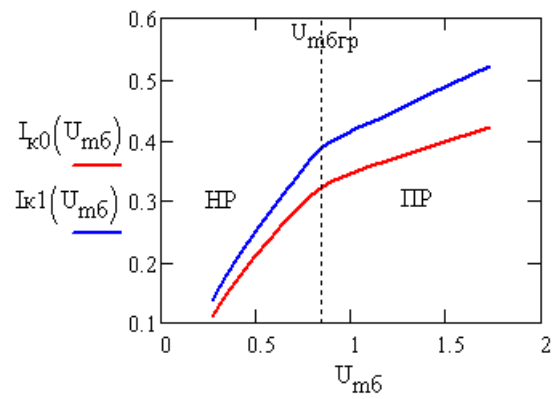


Рис. 4.8

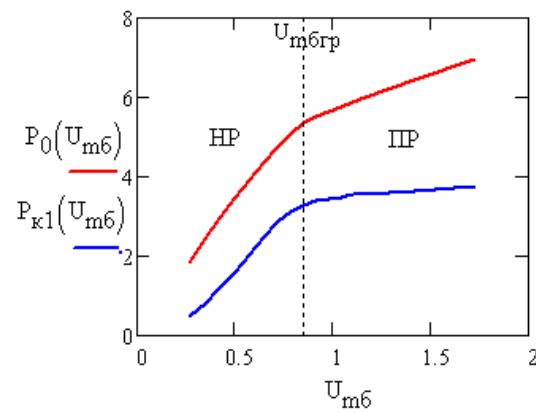


Рис. 4.9

Графики зависимостей потребляемой  $P_0$  и  $P_{k1}$  полезной мощности изображены на рис. 4.9. В перенапряженном режиме полезная мощность остается постоянной, в то время как потребляемая продолжает расти. Поэтому коэффициент полезного действия принимает максимальное значение в окрестности напряжения граничного режима (рис. 4.10).

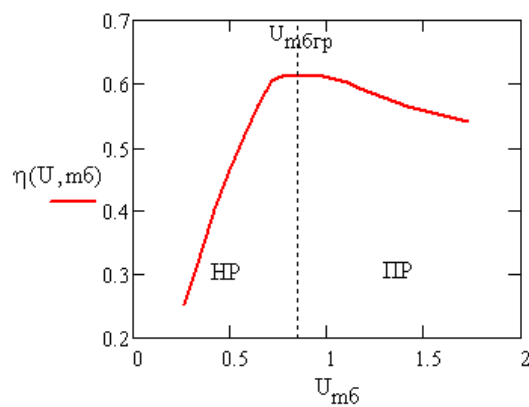


Рис. 4.10

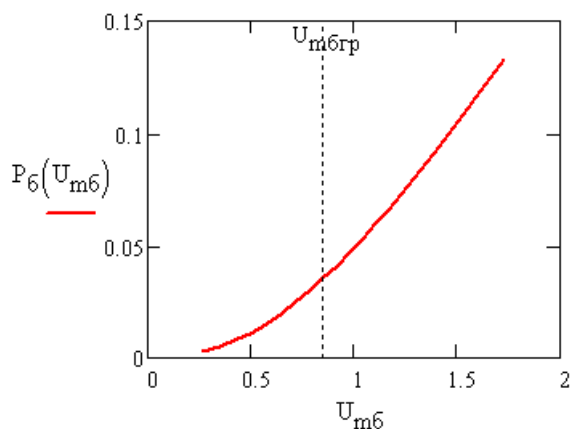


Рис. 4.11

Мощность возбуждения растет (рис. 4.11), а коэффициент усиления по мощности падает (рис. 4.12).

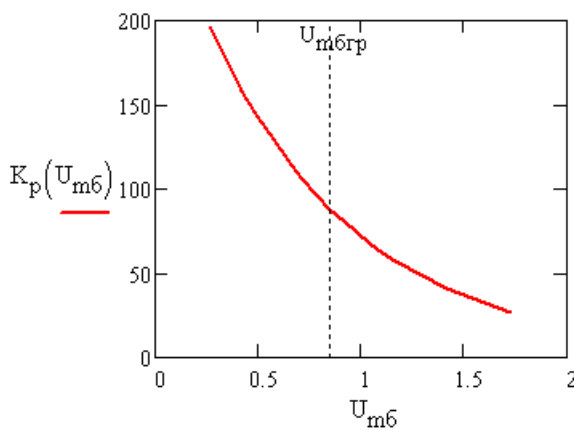


Рис. 4.12

Таким образом, напряженность режима работы ГВВ может регулироваться не только сопротивлением  $R_K$  коллекторной нагрузки, но и напряжением возбуждения  $U_{m6}$ .

**Влияние напряжения смещения на базе  $E_6$ .** Зависимости токов и напряжений от смещения на базе называются статическими модуляционными характеристиками (СМХ) при базовой модуляции смещением. С ростом напряжения смещения составляющие коллекторного тока растут (рис. 4.13). Затем, после прохождения граничного режима и перехода в перенапряженный токи уменьшаются. В недонапряженном режиме существует достаточно протяженный участок, где зависимость  $I_{K1} = f(E_6)$  близка к линейной. Этот участок используется на практике для формирования амплитудно-модулированных колебаний. На рис. 4.13 построены качественные характеристики, учитывающие только тенденцию изменения токов при изменении напряжения смещения. Реальные СМХ подробно исследуются в лабораторной работе, посвященной анализу базовой амплитудной модуляции (лабораторная работа № 8).

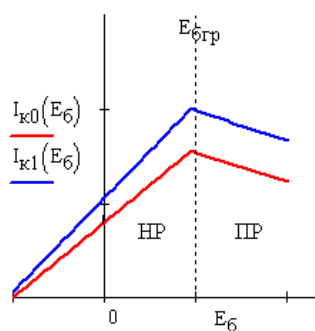


Рис. 4.13

**Влияние напряжения коллекторного питания  $E_k$ .** Зависимости токов и напряжений от напряжения питания называются статическими модуляционными характеристиками при коллекторной модуляции. В недонапряженном режиме токи слабо зависят от коллекторного напряжения (рис. 4.14). Поэтому формирование амплитудно-модулированных колебаний возможно только в перенапряженном режиме.

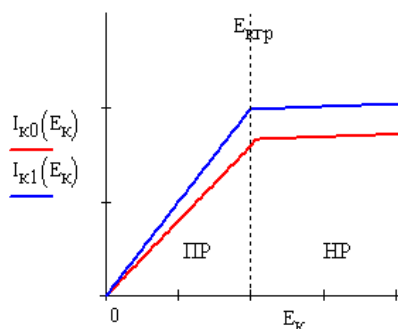


Рис. 4.14

9. Подробному исследованию коллекторных СМХ посвящена лабораторная работа №

## 4.2 Порядок выполнения лабораторной работы

### 1 Построение нагрузочных характеристик ГВВ с резистивной нагрузкой.

Запустите программу MS12.

Откройте файл ЛР 4R.ms10.

Удалите из схемы транзистор BF 517 (рис. 4.15).

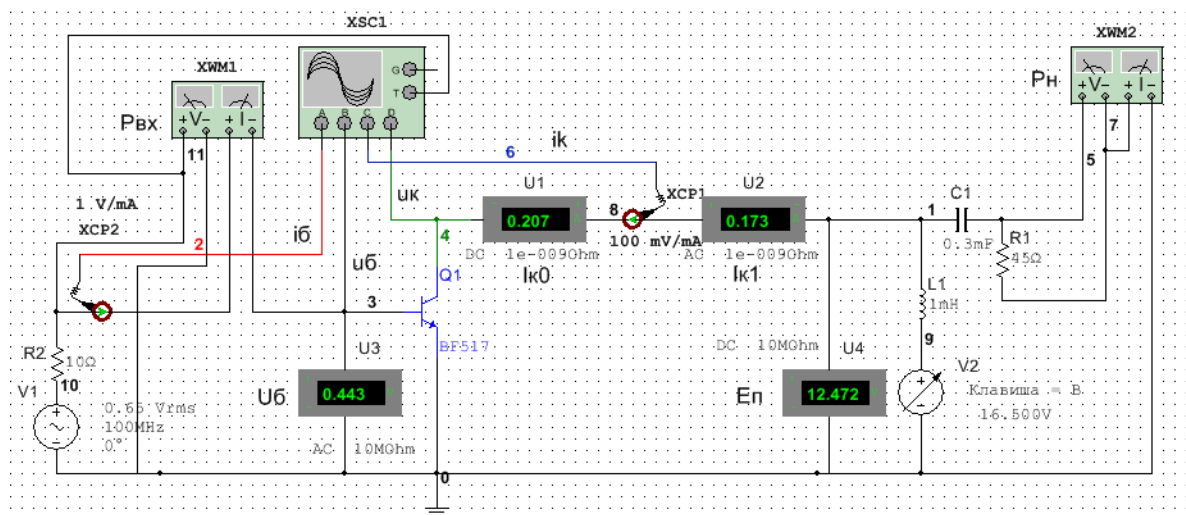


Рис. 4.15

Подключите к схеме транзистор Вашего варианта.

Установите напряжения смещения и коллекторного питания, полученные при расчете ГВВ в лабораторной работе №2.

Изменяйте величину сопротивления нагрузки  $R_1$  от  $0.5 R_{Эном}$  до  $1.5 R_{Эном}$  Ом с шагом 10 Ом, где  $R_{Эном}$  - эквивалентное сопротивление нагрузки, найденное при энергетическом расчете.

При  $R_1 = 0.5 R_{Эном}$  подберите амплитуду напряжения возбуждения (источник напряжения V1), при которой транзистор находится в недонапряженном режиме. Напряженность ежима контролируйте по осциллограммам.

При каждом значении сопротивления  $R_1$  измеряйте составляющие тока коллектора, входную и выходную мощности, амплитуду переменного напряжения на коллекторе. Заполните табл. 1.

Таблица 1

Сопротивление нагрузки $R_1$ , Ом	$I_{k0}$ , А	$I_{k1}$ , А	$P_n$ , Вт	$P_{вх}$	$U_{mk}$	$P_0$ , Вт	$P_k$	КПД, $\eta$	$K_p$

**Примечание.** Виртуальные измерительные приборы показывают средние квадратические значения (rms) переменных токов и напряжений. Амплитуда гармонического сигнала в  $\sqrt{2}$  раз больше rms.

По результатам измерения рассчитайте:

$$P_0 = E_k I_{k0} - \text{потребляемую мощность;}$$

$$P_k = P_0 - P_n - \text{мощность, рассеиваемую на коллекторе транзистора;}$$

$$\eta = P_n / P_0 - \text{коэффициент полезного действия;}$$

$K_p = P_n / P_{\text{ex}}$  - коэффициент усиления мощности.

Постройте графики зависимостей  $U_{mk}(R_k)$ ,  $I_{k1}(R_k)$ ,  $I_{k0}(R_k)$ ,  $P_0(R_k)$ ,  $P_n(R_k)$ ,  $P_k(R_k)$ ,  $\eta(R_k)$ . Сравните с теоретическими.

## 2 Исследование настроечных характеристик ГВВ.

Откройте файл «ЛР 4 K.ms10».

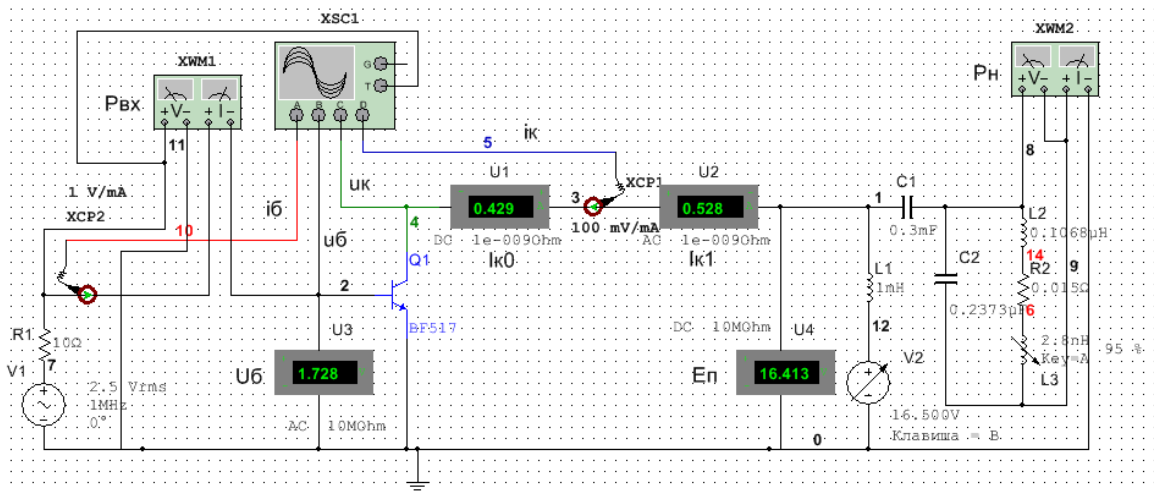


Рис. 4.16

В этой схеме нагрузкой является параллельный колебательный контур C2, L2, R2, L3/ Контур настроен на частоту входного сигнала 1 МГц. Подстройка частоты осуществляется переменной индуктивностью L3.

Установите движок индуктивности L3 в положение 50%.

Напряжение смещения задайте равным напряжению отсечки Вашего транзистора, а напряжение возбуждения подберите так, чтобы транзистор находился в слабо перенапряженном режиме. Напряженность режима контролируйте по осциллограммам (рис. 4.17).

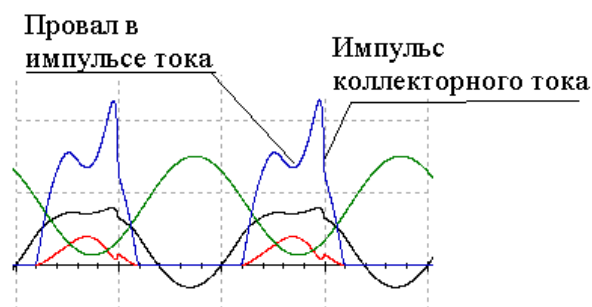


Рис. 4.17

Глубина провала в импульсе коллекторного тока зависит от степени напряженности режима. В граничном режиме провал невелик. По мере возрастания напряженности режима он увеличивается.

Изменяя положение движка индуктивности  $L_3$  от 0% до 100% с шагом 10%, измеряйте составляющие тока коллектора, входную и выходную мощности, амплитуду переменного напряжения на коллекторе. Заполните табл. 2.

Таблица 2

Индуктивность $L_3$ , %	$I_{k0}$ , А	$I_{k1}$ , А	$P_H$ , Вт	$P_0$ , Вт	кпд	$P_{вх}$ , Вт	$K_p$
0							
10							

Постройте графики.

### 3 Исследование зависимостей параметров ГВВ от [напряжения возбуждения](#).

В схеме [рис. 4.16](#) установите напряжение смещения равным напряжению отсечки.

Настройте контур в коллекторной цепи на частоту входного сигнала.

Изменяя амплитуду напряжения возбуждения от 0.2 до 3 В с шагом 0.2 В.

Заполните табл. 3

Таблица 3

Напряжение возбуждения, В	$I_{k0}$ , А	$I_{k1}$ , А	$P_H$ , Вт	$P_0$ , Вт	кпд	$P_{вх}$	$K_p$	Примечание
0.2								Еп= Еб=
0.4								

Постройте графики для токов, мощностей и коэффициентов.

## **4.3 Содержание отчета по лабораторной работе**

### 1 Цель работы.

### 2 Задание на выполнение.

3 Нагрузочные характеристики ГВВ. Таблица экспериментальных данных. Графики характеристик. Осциллограммы токов и напряжений. Сравнение с теоретическими зависимостями.

4 Настроечные характеристики. Таблица экспериментальных данных. Графики характеристик. Осциллограммы токов и напряжений. Сравнение с теоретическими зависимостями.

5 Исследование влияния амплитуды напряжения возбуждения. Таблица экспериментальных данных. Графики характеристик. Осциллограммы токов и напряжений. Сравнение с теоретическими зависимостями.

### 6 Выводы.



#### 4.4 Контрольные вопросы

1. Преимущества и недостатки режима транзистора с отсечкой коллекторного тока по сравнению с линейным режимом.
2. Как определить напряженность режима работы ГВВ?
3. В каком режиме колебательная характеристика близка к линейной?
4. Почему при работе ГВВ в перенапряженном режиме появляется провал в импульсе коллекторного тока?
5. Для схем а) и б) на рис. 4.18 нарисовать вид осциллограммы коллекторного напряжения, если напряжение на базе — гармоническое, а угол отсечки коллекторного тока  $\theta = 90^\circ$ .

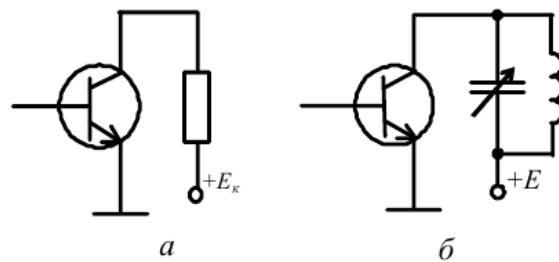


Рис. 4.18

6. Как изменится показание амперметра в схеме на рис. 4.19 при разрыве в цепи сопротивления нагрузки  $R_n$ ? Уменьшится, увеличится, останется неизменным?

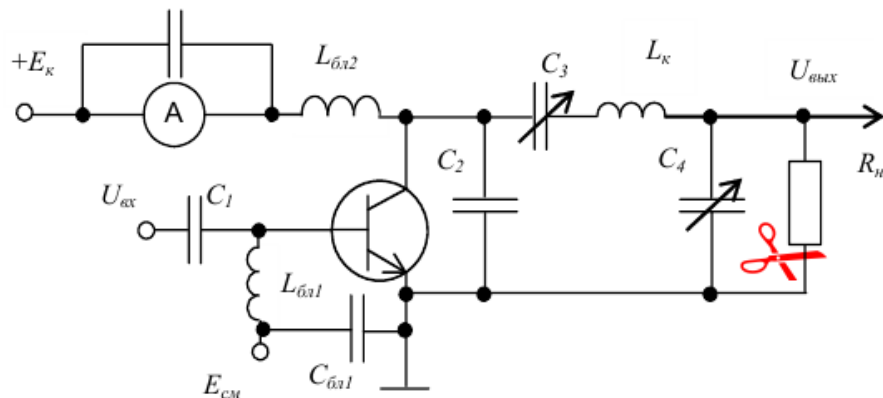


Рис. 4.19

7. Основные требования к контуру в коллекторной цепи транзистора. Основные параметры контура.

## Литература

1. Радиопередающие устройства :Учеб. для вузов / Под ред. В.В. Шахгильдяна. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Радио и связь, 2003. – 559 с.
2. Проектирование радиопередатчиков : Учеб. пособие для студ. вузов / Под ред. В.В.Шахгильдяна. - 4-е изд., перераб и доп. - М. : Радио и связь, 2000. - 653с. : ил.
3. Ворона В.А. Радиопередающие устройства: Основы теории и расчета : Учеб. пособие для вузов. - М. : Горячая линия-Телеком, 2007. - 383с.
3. Генерирование и формирование сигналов. Рабочая программа./ Сост. Ф. В. Голик. – В.Новгород, 2014.- 19 с
5. Устройства генерирования и формирования сигналов. Конспект лекций.[Электронный ресурс] / Сост. Ф. В. Голик, НовГУ им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2013. – 233 с., ил. – Режим доступа: [www.url: https://novsu.bibliotech.ru/](https://novsu.bibliotech.ru/)
6. Расчет и проектирование транзисторных передатчиков: Методические указания/ Авт.-сост. Ф. В. Голик, НовГУ, В. Новгород, 2002. -19 с.
7. Голик Ф. В. Расчет каскадов транзисторных передатчиков. 16 файлов MathCad

## Приложение

### Приложение 1

Параметры модифицированной модели Гуммеля-Пуна для биполярного транзистора

Name	Description	Описание параметра	Единица измерения
Level	Device model level	Уровень модели устройства	
IS	Transport saturation current	Ток насыщения	A
BF	Ideal maximum forward beta	Максимальный коэффициент передачи тока для схемы с ОЭ	
NF	Forward current emission coefficient	Коэффициент эмиссии прямого тока	
VAF	Forward Early voltage	Прямое начальное напряжение (напряжение Эрли)	V
IKF	Corner for forward beta high current roll-off	Максимальный ток, при котором начинается снижение коэффициента прямой передачи тока BF	A
ISE	B-E leakage saturation current	Ток насыщения утечки перехода база-эмиттер	A
NE	B-E leakage emission coefficient	Коэффициент эмиссии утечки перехода база-эмиттер	
BR	Ideal maximum reverse beta	Максимальный коэффициент передачи обратного тока для схемы с ОЭ	
NR	Reverse current emission coefficient	Коэффициент эмиссии обратного тока	
VAR	Reverse Early voltage	Обратное начальное напряжение (напряжение Эрли)	V
IKR	Corner for reverse beta high current roll-off	Максимальный ток, при котором начинается снижение коэффициента обратной передачи тока BR	A
ISC	B-C leakage saturation current	Ток насыщения утечки перехода база-коллектор	A
NC	B-C leakage emission coefficient	Коэффициент эмиссии утечки перехода база-коллектор	
RB	Zero-bias base resistance	Сопротивление базы при нулевом смещении	$\Omega$
IRB	Current where base resistance falls halfway to its minimum value	Ток базы, где её сопротивление уменьшается на 50% между RB и RBM	A
RBM	Minimum base resistance at high currents	Минимальное сопротивление базы при большом токе	$\Omega$
RE	Emitter resistance	Объёмное сопротивление эмиттера	$\Omega$
RC	Collector resistance	Объёмное сопротивление коллектора	$\Omega$
CJE	B-E zero-bias depletion capacitance	Ёмкость перехода база-эмиттер при нулевом смещении	F
VJE	B-E built in potential	Контактная разность потенциалов перехода база-эмиттер	V
MJE	B-E junction exponential factor	Экспоненциальный показатель перехода база-эмиттер	
TF	Ideal forward transit time	Идеальное время прямого переноса заряда	sec
XTF	Coefficient for bias dependence of TF	Коэффициент, определяющий зависимость TF от смещения база-коллектор	
VTF	Voltage describing VBC dependence of TF	Напряжение, описывающее зависимость TF от смещения база-коллектор	V
ITF	High-current parameter for effect on TF	Ток, характеризующий зависимость TF от тока коллектора при больших токах	A

# Продолжение Приложения 1

PTF	Excess phase at freq=1.0/(TF*2PI) Hz	Дополнительный фазовый сдвиг на граничной частоте транзистора $f = \frac{1}{2\pi \cdot TF}$	Deg
CJC	B-C zero-bias depletion capacitance	Ёмкость перехода база-коллектор при нулевом смещении	F
VJC	B-C built in potential	Контактная разность потенциалов перехода база-коллектор	V
MJC	B-C junction exponential factor	Экспоненциальный показатель перехода база-коллектор	
XCJC	Fraction of B-C depletion capacitance connected to internal base node	Доля барьерной ёмкости перехода база-коллектор, подключенная к внешнему узлу базы	
TR	Ideal reverse transit time	Идеальное время обратного переноса заряда	sec
CJS	Zero-bias substrate capacitance	Ёмкость перехода коллектор-подложка при нулевом смещении	F
VJS	Substrate junction built-in potential	Контактная разность потенциалов перехода коллектор-подложка	V
MJS	Substrate junction exponential factor	Экспоненциальный показатель перехода коллектор-подложка	
XTB	Forward and reverse beta temperature exponent	Температурный коэффициент BF и BR	
EG	Energy gap for temperature effect on IS	Ширина запрещённой зоны	eV
XTI	Temperature exponent for effect on IS	Температурный коэффициент IS	
FC	Coefficient for forward-bias depletion capacitance formula	Коэффициент нелинейности барьерной ёмкости прямо смещенного перехода	
TNOM	Parameter measurement temperature	Температура измерений	°C
KF	Flicker noise coefficient	Коэффициент фликкер-шума	
AF	Flicker noise exponent	Показатель степени фликкер-шума	
NK	High-current roll-off coefficient	Показатель степени в зависимости коллекторного тока от токов IKF и IKR	
ISS	Substrate saturation current	Ток насыщения утечки перехода подложки	A
NS	Substrate emission coefficient	Коэффициент эмиссии перехода подложки	
XCJC2	Fraction of CJC connected internally to Rb	Доля барьерной ёмкости перехода база-коллектор, подключенная к внешнему узлу базы	
XCJS	Fraction of CJS connected internally to Rc	Доля барьерной ёмкости перехода коллектор-подложка, подключенная к внешнему узлу коллектора	
TRB1	RB linear temperature coefficient	Линейный температурный коэффициент RB	1/°C
TRB2	RB quadratic temperature coefficient	Квадратичный температурный коэффициент RB	1/°C²
TRC1	RC linear temperature coefficient	Линейный температурный коэффициент RC	1/°C
TRC2	RC quadratic temperature coefficient	Квадратичный температурный коэффициент RC	1/°C²

## Продолжение Приложения 1

TRE1	RE linear temperature coefficient	Линейный температурный коэффициент RE	1/°C
TRE2	RE quadratic temperature coefficient	Квадратичный температурный коэффициент RE	1/°C <sup>2</sup>
TRM1	RBM linear temperature coefficient	Линейный температурный коэффициент RBM	1/°C
TRM2	RBM quadratic temperature coefficient	Квадратичный температурный коэффициент RBM	1/°C <sup>2</sup>
CN	Quasi-saturation temperature coefficient for hole mobility	Температурный коэффициент квазинасыщения для подвижности дырок	
D	Quasi-saturation temperature coefficient for scattering-limited hole carrier velocity	Температурный коэффициент квазинасыщения для подвижности разрозненных дырок	
GAMMA	Epitaxial region doping factor	Коэффициент легирования эпитаксиальной области	
QCO	Epitaxial region charge factor	Множитель заряда эпитаксиальной области	
QUASIMOD	Quasi-saturation model flag for temperature dependence	Флаг квазинасыщения для температурной зависимости	
RCO	Epitaxial region resistance	Сопротивление эпитаксиальной области	Ω
VG	Quasi-saturation extrapolated bandgap voltage at 0 K	Экстраполяция напряжения квазинасыщения при 0° K	V
VO	Carrier mobility knee voltage	Напряжение перегиба зависимости тока эпитаксиальной области	V
T_MEASURED	Parameter measurement temperature	Температура измерения параметров	°C
T_ABS	Model operating temperature	Рабочая температура модели	°C
T_REL_GLOBAL	Change relative to global temperature	Изменение по отношению к глобальной температуре	°C

## Оглавление

Введение .....	4
Порядок проведения лабораторных работ .....	4
Лабораторная работа 1. Исследование статических характеристик биполярного транзистора .....	5
1.1 Теоретические сведения .....	6
1.1.1 Статические характеристики транзистора при включении по схеме с общим эмиттером .....	6
1.1.2 Схема замещения биполярного транзистора. Транзистор как четырёхполюсник .....	7
1.1.3 Расчёт $h$ – параметров .....	9
1.1.3.1 Расчёт по входным характеристикам транзистора .....	9
1.1.3.2 Расчёт по выходным характеристикам .....	10
1.1.4 Расчет параметров транзистора при работе в нелинейном режиме .....	10
1.1.5 Основные параметры модели Гуммеля-Пуна для биполярного транзистора .....	12
1.2. Порядок выполнения лабораторной работы .....	13
1.3 Содержание отчета .....	26
1.4 Контрольные вопросы .....	26
Лабораторная работа 2. Расчет энергетического режима транзисторного ГВВ .....	27
2.1 Теоретические сведения .....	27
2.1.1 Принципы построения генераторов с внешним возбуждением .....	27
2.1.2 Расчет энергетического режима транзисторного ГВВ на заданную мощность и максимальный КПД .....	33
2.2 Порядок выполнения лабораторной работы .....	45
2.3 Содержание отчета по лабораторной работе .....	45
2.4 Контрольные вопросы .....	46
Лабораторная работа 3. Исследование базовой и коллекторной цепей транзисторного ГВВ .....	47
3.1 Теоретические сведения .....	47
3.1.1 Входная (базовая) цепь транзистора .....	47
3.1.2 Выходная (коллекторная) цепь транзистора .....	51
3.2 Порядок выполнения лабораторной работы .....	55
3.3 Содержание отчета по лабораторной работе .....	60
3.4 Контрольные вопросы .....	60
Лабораторная работа 4. Исследование характеристик транзисторного ГВВ .....	62
4.1 Теоретические сведения .....	62
4.1.1 Нагрузочные характеристики ГВВ .....	62
4.1.2 Настраиваемые характеристики ГВВ .....	64
4.1.3 Влияние питающих напряжений на режим ГВВ .....	66
4.2 Порядок выполнения лабораторной работы .....	69
4.3 Содержание отчета по лабораторной работе .....	72
4.4 Контрольные вопросы .....	73
Литература .....	74
Приложение .....	75
Приложение 1 .....	75