

УДК 539.3

ГОЛОВКО А.В. к.т.н., доцент (УкрГАЖТ)
ЦЕХМИСТРО Р.И., к.ф.–м.н., доцент (УкрГАЖТ).

Подсистема исследования статистических характеристик биполярных транзисторов, использующих модель Эберса-Молла и эффект Эрли

Введение

Компьютеризированные подсистемы исследования параметров биполярных транзисторов и устройств на их основе, успешно используются как в автоматизации экспериментальных исследований, так и в процессе эксплуатации систем железнодорожной автоматики.

Данная работа посвящена исследованию биполярного транзистора средней или малой мощности в статическом режиме, которая позволяет сравнивать входные и выходные характеристики снятые экспериментально с теоретическими зависимостями, полученные на основе модели Эберса-Молла с учетом эффекта Эрли [1-3].

Постановка задачи

В учебной литературе имеется немного информации о математических и физических моделях работы биполярных транзисторов в реальных условиях. Например, в явном виде практически отсутствуют формулы, которые описывают поведение выходных характеристик реальных биполярных транзисторов, включающие в себя участок отсечки, активную область и область насыщения. Хотя следует отметить, что с помощью компьютерных программ типа PSpice или Microcap, в которых реальный биполярный транзистор может быть представлен моделью Гумена-Пина, формулы для описания выходных зависимостей могут быть получены [1-5].

Целью данной работы является предложение создания диагностической подсистемы, которая позволяет сопоставлять модели реального транзистора и моделировать физическую сущность процесса изменения сопротивления базы диода с p-n переходом элемента. В приведенных ниже результатах экспериментальные данные, соответствующие выходным характеристикам для схемы с общим эмиттером получены и переданы в ПК в соответствии со схемой, представленной на рис.1.

Основная часть макета

На рис. 1 приведена схема диагностического макета связанного с ПК через com - порт. Данные из этой схемы автоматически переносятся в ПК и сохраняются в текстовом файле.

Диагностический стенд включает в себя традиционную схему снятия входных и выходных характеристик биполярного транзистора по схеме с общим эмиттером, которая дополнена делителем R5-R6. Напряжение с делителя подается на схему АЦП выполненную на микросхеме AD7896 с источником опорного напряжения +5V на микросхеме REF195. Согласование уровней сигналов обеспечивается использованием микросхемы MAX-232 связанной с последовательным портом компьютера. Питание микросхеме AD7896 осуществлялось источником опорного напряжения, а для микросхемы MAX-232 использовался отдельный стабилизатор питания на микросхеме 78L05 с выходом

на 5В и входом на 9-12 В. Эта микросхема имеет в своем составе преобразователь напряжения, преобразующий однополярное напряжение питания +5В в биполярное ±10 В. Входной каскад АЦП

включает в себя делитель напряжения на двух одинаковых резисторах, отличных от R5-R6, которые также обеспечивают токовую защиту входов.

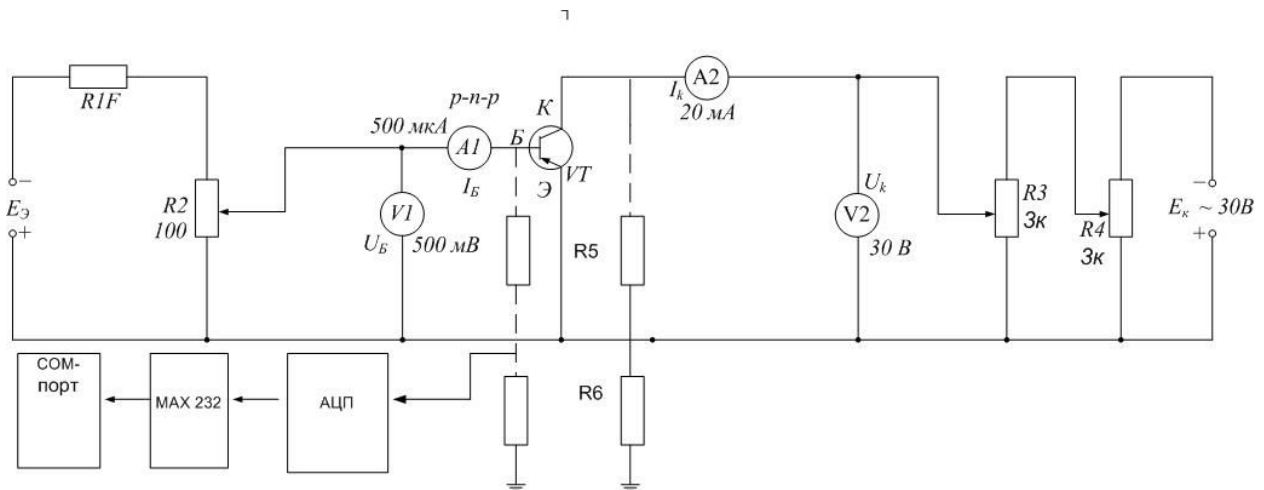


Рис. 1. Схема диагностического макета связанного с ПК через com – порт

Конструкция стенда представлена на рисунке 2а, где также показана реализации нижней части схемы (рис. 1), которая обеспечивает взаимодействие с компьютером.

На рисунке 2б представлен модуль взаимодействия схем снятия входных и выходных характеристик с компьютером.

Программная часть стенда. Программное обеспечение автоматизированного стенда разработано в среде C++ Builder и состоит из модуля обеспечивающего прием-передачу данных от АЦП аппаратного модуля через com – порт и сохраняющие их в текстовом файле для последующего отображения информации на графике (рис. 3). На рисунке 2 представлена главная форма автоматизированной системы на котором представлена панель для отображения экспериментально снятых зависимостей позволяющая изменять количество вводимых значений аргумента и сопоставлять их с расчетными данными по соотношению [6-8]:

$$I = I_o \left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) \quad (1)$$

Для данного соотношения предусмотрено задание максимального и минимального значения напряжения U (аргумента) и значения I_o.

Программа взаимодействия с последовательным портом включает в себя сегмент инициализации порта, включающий в себя пользовательское включение линии готовности порта к соединению.

Используются опции выбора скорости передачи данных и включение линии запроса обмена данных. Кнопка открыть порт позволят принимать или передавать данные.

Сегмент передачи данных через последовательный порт включает в себя окно для ввода данных для передачи и окно для отображения принятых данных и последующего сохранения их в текстовом файле для дальнейшего отображения в графическом виде.

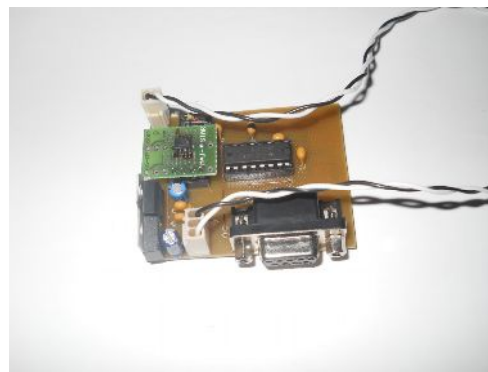
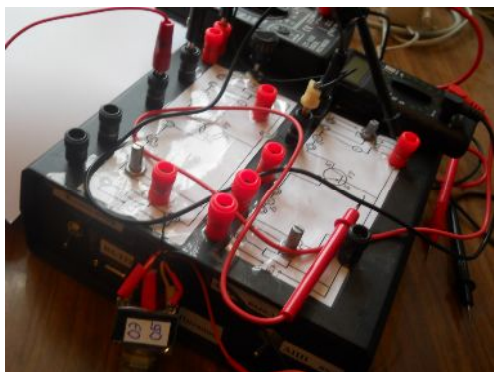


Рис.2. а)- Изображение конструкции стенда и б)-модуль взаимодействия схем снятия входных и выходных характеристик с компьютером

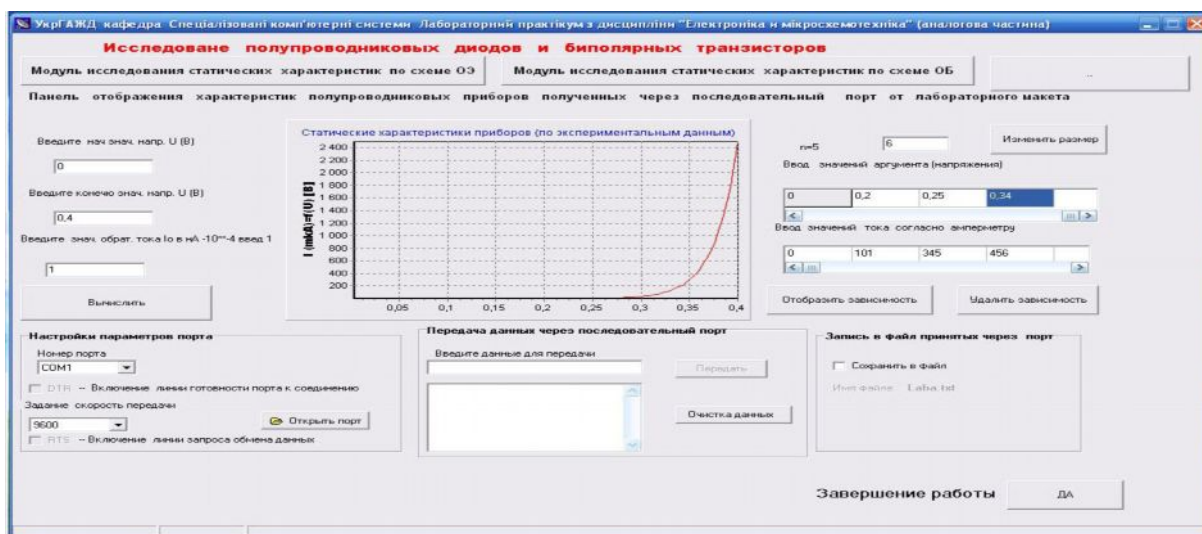


Рис. 3. Изображение информации на мониторе ЭВМ

В него также входит модуль, обеспечивающий графическое отображение входных и выходных характеристик по схеме с общим эмиттером с консольным вводом данных от амперметра и вольтметра, что дает возможность выделить области насыщения, активную область, область отсечки. Предусмотрена возможность задания количества (до 100) вводимых значений показаний значения тока и напряжения.

Указанный модуль предусматривает также возможность расчета входной характеристики по соотношению [9-12]:

$$I = I_o \left(1 + \frac{U_{кз}}{U_{эр}} \right) \left(e^{\frac{qU_{бэ}}{kT}} - 1 \right) \quad (2)$$

где I_o – обратный ток P-N перехода,

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл,}$$

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К,}$$

$$T = 300 \text{ К,}$$

$U_{эр}$ – напряжение Эрли.

Это напряжение, которое вводится для описания явления “модуляции ширины базы”, приводящее к изменению ее сопротивления, имеет вид [9-10,13]:

$$U_{эр} = \frac{q(Wb)^2 Nd}{2\xi}, \quad (3)$$

где q – заряд электрона,
 Wb – толщина базы транзистора,
 Nd – концентрация донорных примесей,
 ξ – диэлектрическая проницаемость.

Значение напряжения Эрли обычно составляет в зависимости от типа транзистора десятки вольт.

В программе предусмотрен ввод значений тока насыщения, напряжений $U_{bэ}$, $U_{кэ}$. На одних и тех же графиках имеется возможность отобразить экспериментальную зависимость $I_b = f(U_{bэ})$ $U_{кэ} = \text{const}$ и аналогичные зависимости полученные теоретически. Указанная зависимость позволяет определить статические параметры h_{11e} – входное сопротивление ($h_{11e} = \Delta U_{be} / \Delta I_e$) как по теоретическим так и экспериментальным зависимостям и сопоставляя их.

Выходная характеристика биполярного транзистора в соответствии со схемой общий эмиттер описывается зависимостью $I_k = f(U_k)$ $I_b = \text{const}$:

$$I_k = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_{\sigma} + \frac{I_{к0}}{1-\alpha} + \frac{U_k}{(1-\alpha)r_k}, \quad (4)$$

где α – коэффициент передачи,
 $I_{к0}$ – обратный ток коллектора,
 U_k – напряжение на коллекторе,

r_k – сопротивление коллекторного перехода.

Результаты моделирования

Запрограммированные аналитические соотношения позволяет сопоставить математические модели реальных транзисторов с экспериментальными результатами в которых учитывается сопротивление базы. Если учесть сопротивление базы, то соотношение (1) преобразуется в вид [9-10]:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{q(U - R_{\sigma} I)}{kT}} - 1 \right) \quad (5)$$

Из него следует, что в явном виде зависимость тока от напряжения определить невозможно. С увеличением сопротивления базы наклон вольт-амперной характеристики уменьшается, что, как известно, обусловлено тем, что часть общего приложенного напряжения распределяется на сопротивление базы.

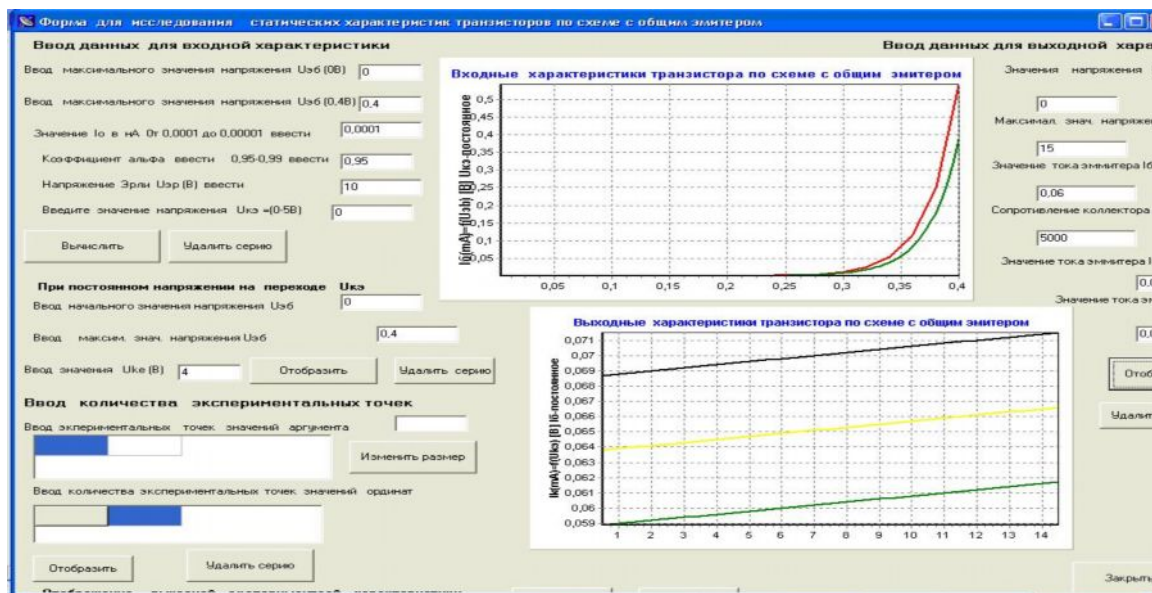


Рис.4. Форма вывода результатов исследования

Сопротивление базы транзистора которое вызвано изменением (диода) зависит от напряжения на распределения неосновных носителей в соседнем переходе, что, в свою очередь, в базе. Изменение распределения приводит к изменению ширины базы, концентрации неосновных носителей в

области базы изменяет ток протекающий через диод.

Для нахождения зависимости тока через переход коллектор – база (эмитер–база) от напряжения приложенного к переходу введем в рассмотрение распределение $\Delta p(x)$ в области базы (р-п-р транзистор). Общее приложенное напряжение распределяется на напряжение на р-п и на напряжении на базе.

Для детальной оценки влияния сопротивления базы на входные характеристики транзистора перепишем соотношение в виде (5):

$$V(I) = IR_b - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I}{I_0} + 1 \right) \quad (6)$$

Сопротивление базы диода будет зависеть от распределения концентрации неосновных носителей в области базы и, следовательно, от тока через диод. Определим распределение неосновных носителей в области базы $\Delta p(x)$ и сопротивление базы R_b . Введем в рассмотрение падение напряжения на р-п переходе и на базе [12-13]:

$$V(I) = V_{pn} + V_{Rb} \quad (7)$$

Напряжение на базе выражается через распределение поля $E(x)$ вдоль базы:

$$V_{Rb} = \int_0^l E(x) dx \quad (8)$$

где l – длина базы.

Напряженность поля определяется через уравнение выражающее плотность тока протекающего через область базы (п-типа), которое включает в себя диффузионную и дрейфовую составляющие, как для тока электронов, так и для дырок:

$$E(x) = \frac{I - qD_p(\mu_n/\mu_p - 1)dP(x)/dx}{q\mu_n n_0 \left(1 + \frac{\left(1 + \frac{\mu_p}{\mu_n} \right)}{n_0 P(x)} \right)}, \quad (9)$$

где I – ток через диод;
 D – коэффициент диффузии дырок;
 μ_n – подвижность электронов,
 μ_p – подвижность дырок,
 n_0 – равновесная концентрация электронов.

$dP(x)$ -распределение неосновных носителей в результате инжекции р-п переходом $b-\mu/\mu_p$.
 Распределение концентрации носителей в области базы задается соотношением:

$$\Delta P(x) = P_n e^{\frac{qV}{kT}} \left(\frac{sh \left(\frac{l-x}{L_p} \right)}{sh \left(\frac{l}{L_p} \right)} \right). \quad (10)$$

Подставляя $\Delta p(x)$ в $E(x)$ и интегрируя от 0 до L получили вольт-амперную характеристику испытуемого перехода база-эмиттер.

$$V_b = \int_0^l E(x) dx = \int_0^l \frac{I - qD_p(\mu_n/\mu_p - 1)(dP(x)/dx) dx}{q\mu_n n_0 \left(1 + \frac{\left(1 + \frac{\mu_p}{\mu_n} \right)}{n_0 P(x)} \right)} \quad (11)$$

Соотношение 11 можно разбить на два слагаемых, т.е. на слагаемое со значением тока в числителе в подинтегральном выражении и слагаемое с остальными членами из числителя.

После преобразований получим:

$$V(I) = \frac{I L_p (1+a)^{-1/2}}{q \mu_n n_0 \left(1 + \left(\frac{1+b^{-1}}{n_0} \right) P_0 \right)} \ln \left(\frac{\left(\left(\frac{I L_p}{2 L_p} - a + \sqrt{1+a^2} \right) \left(a + \sqrt{1+a^2} \right) \right)}{\left(\left(\frac{I L_p}{2 L_p} - a - \sqrt{1+a^2} \right) \left(\sqrt{1+a^2} - a \right) \right)} \right) + \frac{kT(b-1)}{q(b+1)} \ln \left(\frac{1 + (1+b^{-1})/n_0 (P_n + \Delta P)}{1 + \frac{(1+b^{-1})P_0}{n_0}} \right) \quad (12)$$

$$a = \frac{\left(\frac{1+b^{-1}}{n_0} \right) P_n \frac{J}{J_0}}{1 + \left(\frac{1+b^{-1}}{n_0} \right) P_n \operatorname{sh} \left(\frac{l}{L_p} \right)} \quad (13)$$

Второе слагаемое представляет из себя потенциал Дембера:

$$U_2 = \int_0^l \frac{D_p(b-1)}{\mu_n n_0 (1 + (1+b^{-1})P(x)/n_0)} - \frac{dP(x)}{d(x)} dx \quad (14)$$

Подставляя соотношение (10) в (13) получим:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{q(U - (b-1)/(b+1) \ln \left(\frac{1 + ((1+b^{-1})/n_0)(P_n + \Delta P(x))}{((1+b^{-1})/n_0)(P_n + \Delta P(x))} \right))}{kT}} - 1 \right) \quad (16)$$

Анализ выходных и входных статических характеристик наглядно демонстрирует, что имеет место заметный рост тока i_K с ростом $u_{KЭ}$, связанный с эффектом Эрли. Этот рост выражен значительно сильнее, чем в схеме ОБ в связи с более резкой зависимостью от напряжения на коллекторном переходе коэффициента передачи тока базы по сравнению с коэффициентом передачи тока эмиттера. Также более резкой зависимостью от тока эмиттера и, соответственно, от тока базы объясняется практическое отсутствие эквивалентности выходных характеристик.

Особенностью выходной характеристики транзистора в схеме с общим эмиттером по сравнению с характеристикой в схеме с общей базой, является то, что она целиком лежит в первом квадранте. Это связано с тем, что в схеме ОЭ напряжение $u_{KЭ}$ распределяется между двумя переходами, и при $u_{KЭ} < u_{БЭ}$ напряжение на коллекторном переходе меняет знак и стано-

Из него следует, что при $\Delta p=0$, $U_2=0$. Следовательно, можно предположить, что решающий вклад в падение напряжения на базе вносит потенциал Дембера. Это следует из того что в нем учитывается градиент концентраций распределения носителей заряда. Тогда, обозначив $U_6 = U_2$ соотношение (5) представим в следующем виде:

вится прямым, в результате транзистор переходит в режим насыщения при $u_{KЭ} > 0$.

Объемное сопротивление базы для разных транзисторов составляет десятки или сотни Ом.

Объемное сопротивление базы влияет на свойства транзисторов. Большое значение r_B' приводит к возрастанию активных потерь в транзисторе, ухудшению его частотных свойств и к уменьшению температурной стабильности. В тоже время малое сопротивление r_B вызывает снижение напряжения пробоя и увеличение барьерной емкости коллекторного перехода.

Дифференциальное сопротивление базы r_B'' определяет величину обратной связи в транзисторе.

Выводы

Таким образом влияние сопротивление базы, приводящее к

дополнительному падению напряжения приводит к уменьшению току протекающему через р-п переход может быть выражена через градиент концентраций неравновесных носителей тока. Полученное соотношение (15) описывает вид вольт-амперной характеристики также эффективно как и соотношение Эрли (2), что показал численный анализ позволяет более точно проводить проверку транзисторов стендом. Сравнение экспериментально снятые входные характеристики со справочными данными для транзистора BC556A (р-п) и с теоретической зависимостью по соотношению (2), показало приемлемое для эксплуатационной точности совпадение результатов. Погрешность стенда составляет не более 10% если принять за эталонные справочные данные. Сравнения результатов расчетов по соотношениям (2), учитывающее свойство базы р-п перехода (эффект Эрли) с результатами полученными по соотношению (15), показало совпадение в пределах 5%,

Список литературы

1. Massobrio G., Antognetti P. Semiconductor Device Modeling with SPICE. Second Edition. McGraw-Hill, Inc. 1988. – 479 p.
2. Архангельский А.Я. PSpice и Design Center. В 2-х ч. Часть 1. Схемотехническое моделирование. Модели элементов. Макромоделирование. Учебное пособие. - М.: МИФИ, 1996. - 236 с.
3. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 630 с., ил.
4. Носов Ю.Р. и др. Математические модели элементов интегральной электроники. - М.: Сов. Радио. 1976. – 304 с.
5. Разевиг В.Д. Система сквозного проектирования электронных устройств Design Lab 8.0. – М.: Солон 1999. – 698 с.

6. Физика твердого тела: Энциклопедический словарь /Гл. ред. В.Г. Барьяхтар, зам. глав. ред. В. Л. Винецкий. Т. 1, 2. Киев: Наукова думка, 1998.

7. Sah C.-T. Fundamentals of solid-state electronics /C.-T. Sah. World Scientific, 1991. 1011 p.

8. Киреев А.С. Физика полупроводников /А.С. Киреев. М.: Высшая школа, 1969. 590 с.

9. Бонч-Бруевич В.Л. Физика полупроводников /В.Л. Бонч-Бруевич, С. Г. Калашников. М.: Наука, 1977. 672 с.

10. Зи С. Физика полупроводниковых приборов /С. Зи. М.: Мир, 1984. Т.1, 456 с; Т.2, 456 с.

11. Шалимова К.В. Физика полупроводников /К.В. Шалимова. М.: Энергия, 1976. 416 с.

12. Орешкин П.Г. Физика полупроводников и диэлектриков /П.Г. Орешкин. М.: Высшая школа, 1972. 448 с.

13. Гуртов В.А. Сборник задач по физике поверхности полупроводников /В.А. Гуртов. Петрозаводск, 1985. 92 с.

Аннотации:

Работа посвящена моделированию работы биполярного транзистора средней или малой мощности в статическом режиме. Методом сравнения входных и выходных характеристик с теоретическими зависимостями устанавливается их работоспособность.

Работа присвячена моделюванню роботи біполярного транзистора середньої або малої потужності в статичному режимі. Методом порівнювання вхідних і вихідних характеристик з теоретичними залежностями встановлюється їх працездатність.

The work deals with modeling of the bipolar transistor medium or low power static mode. The method of comparing the input and output characteristics with theoretical predictions set their performance.

