

А.В. Шевкунова
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный
университет путей сообщения»,
г. Ростов-на-Дону

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ LTSPICE ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА (BJT)

В данной статье рассмотрены некоторые функциональные особенности программного продукта LTSpice XVII. В качестве рассматриваемого объекта за основу был взят биполярный транзистор npn типа. В результате были получены входная характеристика и семейство выходных характеристик.

Ключевые слова: биполярный транзистор; моделирование; программа LTSpice; входные и выходные характеристики.

A.V. Shevkunova

Rostov State Transport University, Rostov-on-Don

USING LTSPICE TO PLOT THE CHARACTERISTICS OF A BIPOLAR TRANSISTOR (BJT)

This article discusses some of the functional features of the LTSpice XVII software product. As the object under consideration, an npn-type bipolar transistor was taken as the basis. As a result, an input characteristic and a family of output characteristics were obtained.

Keywords: bipolar transistor; simulation; LTSpice program; input and output characteristics.

Транзистор является основным компонентом преобразовательной техники. Как известно, транзистор – это управляемый полупроводниковой прибор, усиливающий электрические сигналы. Данные свойства широко используется в электронной промышленности, без которой невозможно представить работу ни одной отрасли промышленности развитых стран. Главной составляющей проектирования какого-либо технического устройства является компьютерное моделирование, которое при корректном использовании, позволяет учитывать и оптимизировать результаты предварительных теоретических расчетов. Также оно дает возможность итерационным методом в интерактивном режиме подбирать определенные параметры и следить за работой проектируемого устройства на каждом шаге.

В настоящее время в сфере конструкторского проектирования среди разработчиков электронных устройств довольно большую популярность приобрели, так называемые SPICE-программы. Одна из таких программ – LTSpice, представляющая собой симулятор, результатом моделирования которого являются корректные и высокоточные модели [1–3]. Данный программный продукт позволяет моделировать цифровые, аналоговые и

смешанные схемы за достаточно короткое время. Для более детального изучения программного продукта LTSpice можно воспользоваться следующими учебными пособиями [4, 5], в которых подробно описаны вопросы работы со схемным редактором, моделировании электронных схем и электротехнических устройств, а также работа в графическом постпроцессоре. Целью данной статьи является ознакомление с основами работы в программе LTSpice на примере построения схемы с биполярным транзистором и последующим получением и анализом входной и выходных характеристик рассматриваемого объекта.

В данной статье рассмотрен пример включения биполярного транзистора NPN типа с тремя общими выводами (соответственно коллектор (collector), база (base), эмиттер (emitter)) по схеме с общим эмиттером. Наибольшее распространение этого варианта подключения транзистора получено за счет усиления по току, напряжению и мощности, а также за счет наличия высокого входного и низкого выходного сопротивления. В данной программе используется математическая модель биполярного плоскостного транзистора Гуммеля-Пуна, которая за исключением некоторых параметров упрощается к модели Эберса-Молла. В качестве исследуемого объекта был выбран биполярный транзистор 2N222, Spice-модель которого выглядит следующим образом: `.model 2N222 NPN (Is=1E-14 VAF=100 BF=200 IKF=0.3 XTB=1.5 BR=3 CJC=25E-12 TR=100E-9 TF=400E-12 ITF=1 VTF=2 XTF=3 RB=10 RE=.2 Vceo=30 Icrating=800m mfg=NXP`. Наименование некоторых параметров: I_s – ток коллектора; V_{ceo} – напряжение коллектор-эмиттер; I_s – ток насыщения при 27 °C; BF – коэффициент усиления тока в нормальном режиме в схеме с общим эмиттером (токи утечки не учитываются), а наиболее полное описание параметров представлено в учебно-научной литературе [4, 5].

На первом этапе была построена схема с биполярным транзистором для получения входной характеристики. Данная схема в окне программы изображена на рис. 1, на котором номера соответствуют следующим элементам: 1 – источник напряжения задаваемой формы; 2 – биполярный транзистор NPN типа; 3 – источник напряжения с постоянным значением 10 В; 4 – нулевой провод или «земля» (данный элемент является обязательным и относительно него производится расчет узловых потенциалов схемы).

Входные характеристики биполярного транзистора представляют собой экспоненциальную зависимость тока базы (I_B) от напряжения между базой и эмиттером ($U_{БЭ}$), при постоянном напряжении на коллекторе ($U_{КЭ}$) и они мало зависят от напряжения на коллекторе. Именно поэтому в данной статье приведена одна кривая при $U_{КЭ} = 10$ В. Таким образом, источник напряжения V1 (рис. 1) настроен на постоянное напряжение 10 В, а источник V2 на изменение напряжения от -1 до 5 В с шагом 100мВ.

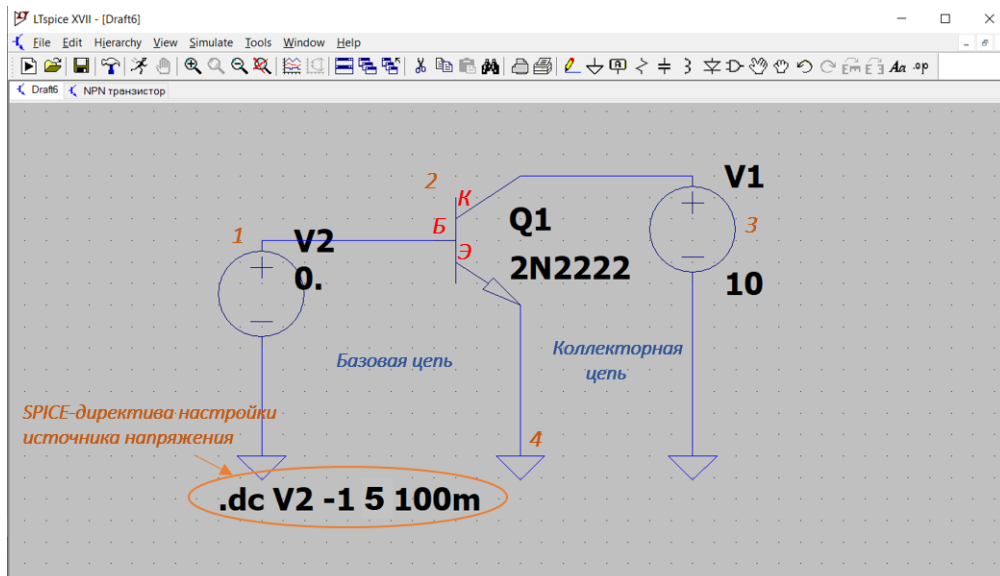


Рисунок 1 – Схема в программе LTSpice для снятия входной характеристики биполярного транзистора

В общем LTSpice позволяет проводить шесть видов анализа собранных схем. Для данного примера был проведен анализ «DC sweep – по постоянному току при вариации источников», который дает возможность в результате получить необходимые статические характеристики. Таким образом, была получена входная характеристика транзистора 2N2222 (рис. 2, в) и для визуализации процессов, а также ознакомления с интерфейсом на рисунке 2, г представлено напряжение между базой и эмиттером с графическим обозначением координат, а на рисунке 2, а и б инструменты, посредством которых измеряются различные электрические величины.

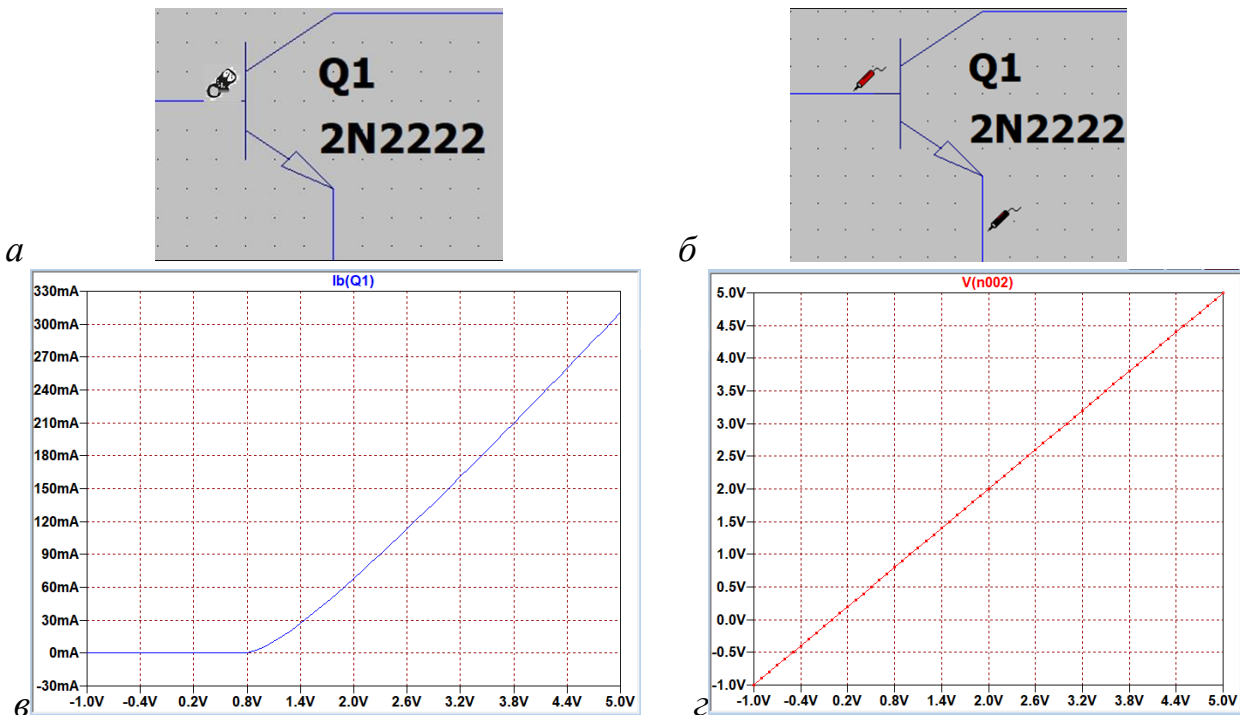


Рисунок 2 – Токовые клещи а), щуп б), входная характеристика транзистора 2N2222 в) и напряжения между базой и эмиттером г)

Выходные характеристики биполярного транзистора отображают зависимость тока коллектора (I_K) от напряжения между коллектором и эмиттером ($U_{КЭ}$), при постоянном значении тока базы (I_B). Количество выходных характеристик в справочниках обычно приводится не менее чем для пяти значений тока базы. В настоящем исследовании был произведен расчет для десяти фиксированных значений I_B с шагом 2мкА. Схема для снятия выходных характеристик приведена на рисунке 3, где под номером 1 – источник тока, а выделенная Spice-директива обозначает следующее: источник напряжения V1 настроен на изменение напряжения от 0 до 1 вольта с шагом 10мВ, а источник тока I1 – на изменение тока от 0 до 20мкА с шагом 2мкА.

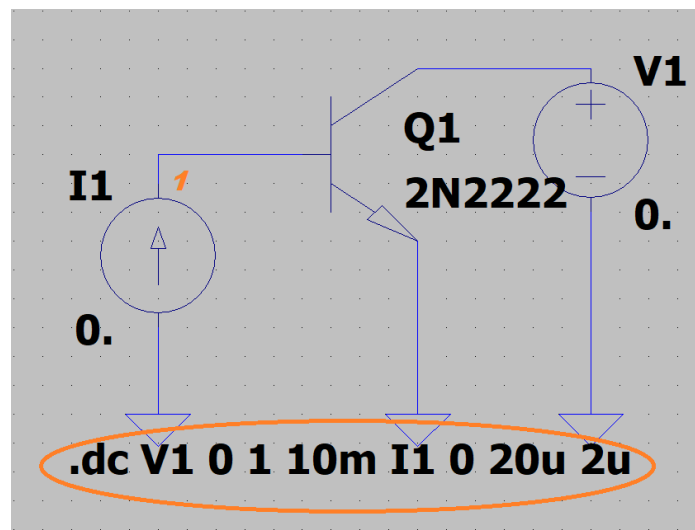


Рисунок 3 – Схема в программе LTSpice для снятия выходных характеристик биполярного транзистора

После окончания моделирования при активации кнопки «Run» выводится окно плоттера, в котором семейство выходных характеристик транзистора 2N2222 выглядят следующим образом (с применением масштабирования) (рис. 4). Таким образом, получено 11 кривых при фиксированном $\Delta I_B = 2$ мкА.

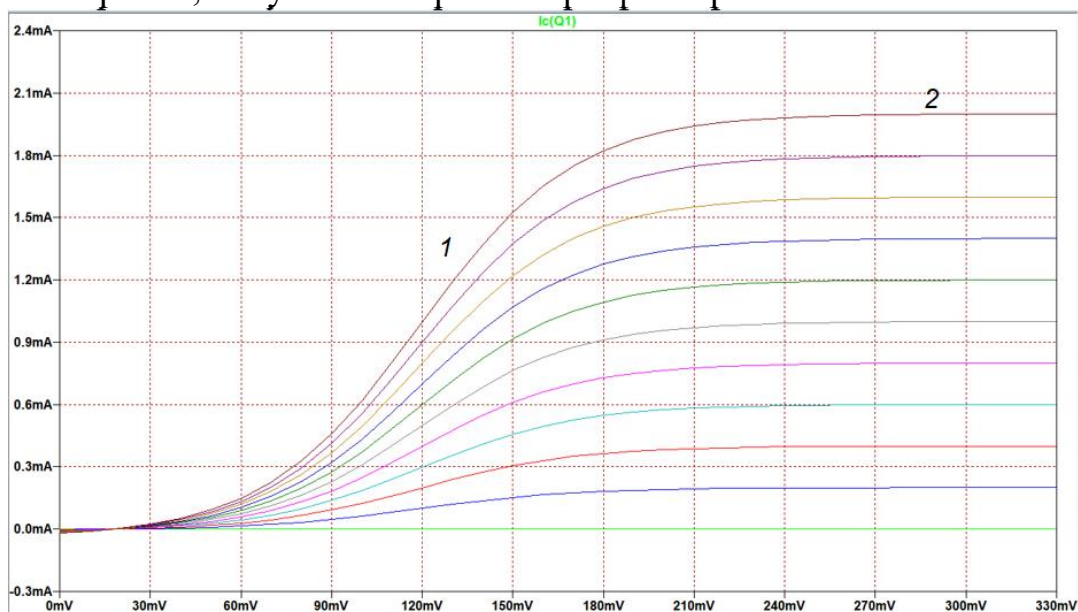


Рисунок 4 – Выходные характеристики транзистора 2N2222

Из полученной выходной характеристики можно выделить следующее: область, расположенная под первой характеристикой соответствует режиму глубокой отсечки ($U_{бэ} < 0$), при котором эмиттерный и коллекторный переходы заперты. При $I_b = 0$ мкА характеристика соответствует режиму с оторванной базой, т.е. при данном режиме из коллектора в эмиттер течет только сквозной ток. На выходных характеристиках условно можно выделить три области. Первая область – это нелинейная область с ярко выраженной зависимостью I_k от $U_{кэ}$, что является режимом насыщения. Вторая область характеризуется линейными участками (почти горизонтальными), на которых прослеживается очень слабая зависимость тока коллектора от напряжения коллектор-эмиттер. Малый подъем объясняется эффектом модуляции базы. В таком режиме, т.е. активном режиме, биполярный транзистор ведёт себя как источник тока, управляемый током базы. Третья область (на рис. 4 не изображена) – область пробоя, зачастую не используемая в качестве рабочей.

С помощью выходных характеристик можно определить различные производные параметры, например, дифференциальное сопротивление коллектора, коэффициент передачи базового тока в цепь коллектора и т.д.

Таким образом, на примере построения схемы с биполярным транзистором с последующей визуализацией его характеристик, а также исходя из многочисленных научных публикаций, можно утверждать, что программный продукт LTSpice достаточно универсален. Его функционал позволяет пользователю проводить моделирование электрических цепей и электронных схем с последующей визуализацией результатов.

Список литературы

1. Кукушкин, Ф.А. Применение средств моделирования LTSpice IV при проектировании инверторных источников питания / Ф.А. Кукушкин, Л.С. Майорова, К.В. Куликов // В сборнике: Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XIX Бенардосовские чтения). Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 175-летию со дня рождения Н.Н. Бенардоса, 2017. – С. 29–32.

2. Liashov, M.V. Parametric optimization subsystem in ltspice environment of analog microcircuits for operation at low temperatures / M.V. Liashov, N.N. Prokopenko, A.A. Ignashin [etc.] // В сборнике: 2019 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTs 2019. – 2019. – P. 8884446.

3. Белый, А.В. Сравнительный анализ теплового моделирования электронных средств с помощью программ LTSPICE и АСОНИКА-Т / А.В. Белый, Э.Р. Гурбанов, С.Ю. Сотникова // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. – 2016. – № 1. – С. 180–182.

4. Володин, В.Я. LTspice: компьютерное моделирование электронных схем / В.Я. Володин. – СПб. : БХВ-Петербург, 2010. – 400 с.

5. Сохор, Ю.Н. Моделирование устройств в LTSpice : учебно-методическое пособие / Ю.Н. Сохор. – Псков : Издательство ППИ, 2008. – 165 с.

Сведения об авторах

Шевкунова Анастасия Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав», Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, e-mail: nastya3051990@mail.ru

About the authors

Shevkunova Anastasia Vladimirovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Traction Rolling Stock, Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, e-mail: (hidden)