

**М.С. РОДЮКОВ**

**ЭЛЕКТРОНИКА**  
**Расчёт характеристик транзистора**  
**с использованием программ схемотехнического**  
**моделирования**

Методические указания по выполнению домашней работы

...

УДК 621.3

ББК 31.2

P160

**Родюков М.С.** [Электронный ресурс]: ЭЛЕКТРОНИКА. Расчёт характеристик транзистора с использованием программ схемотехнического моделирования. Методические указания по выполнению домашней работы / Родюков М.С. — М.: Российский технологический университет МИРЭА, 2019. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Методические указания содержат методику получения входных и выходных характеристик биполярного транзистора и расчёта  $h$ -параметров схемы замещения с помощью программ схемотехнического моделирования Electronic Workbench 5.12 и TINA TI. Методические указания подробно раскрывают данный раздел домашней работы «Расчёт усилительного каскада с общим эмиттером», входящей в программу подготовки по дисциплине «Электроника» для большой группы направлений подготовки и специальностей Университета.

Методические указания издаются в авторской редакции.

Авторский коллектив: Родюков Михаил Сергеевич

Рецензент:

Минимальные системные требования:

Наличие операционной системы Windows, поддерживаемой производителем.

Наличие свободного места в оперативной памяти не менее 128 Мб.

Наличие свободного места в памяти хранения (на жестком диске) не менее 30 Мб.

Наличие интерфейса ввода информации.

Дополнительные программные средства: программа для чтения pdf-файлов (Adobe Reader).

Подписано к использованию по решению Редакционно-издательского совета

МИРЭА – Российского технологического университета от \_\_\_\_\_ 2019 г.

Объем \_\_\_\_\_ Мб

Тираж 10

© Родюков М.С., 2019

© Российский технологический университет  
МИРЭА, 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |    |
|---|----|
| 1. Построение входных и выходных характеристик транзистора в среде Tina TI4 |    |
| 1.1. Определение предельных параметров транзистора .....                    | 4  |
| 1.2. Установка программы.....   | 5  |
| 1.3. Построение характеристик.....  | 6  |
| 1.4. Построение семейства выходных характеристик.....                       | 6  |
| 1.4.1. Подготовка схемы для исследования.....                               | 6  |
| 1.4.2. Построение выходных характеристик .....                              | 9  |
| 1.4.3. Расчёт h-параметров по выходным характеристикам.....                 | 20 |
| 1.4.4. Расчёт $h_{22}$ .....  | 21 |
| 1.4.5. Расчёт $h_{21}$ .....  | 22 |
| 1.5. Построение семейства входных характеристик.....                        | 23 |
| 1.5.1. Подготовка схемы для исследования.....                               | 23 |
| 1.5.2. Построение входных характеристик.....                                | 24 |
| 1.5.3. Расчёт h-параметров по входным характеристикам.....                  | 33 |
| 1.5.4. Расчёт $h_{11}$ .....  | 34 |
| 1.5.5. Расчёт $h_{12}$ .....  | 35 |
| 2. Построение входных и выходных характеристик транзистора в среде EWB      | 37 |
| 2.1. Определение предельных параметров транзистора .....                    | 37 |
| 2.2. Построение характеристик.....  | 38 |
| 2.3. Запуск программы.....  | 38 |
| 2.4. Построение семейства выходных характеристик.....                       | 40 |
| 2.4.1. Подготовка схемы для исследования.....                               | 40 |
| 2.4.2. Построение характеристик.....  | 41 |
| 2.4.3. Настройка внешнего вида характеристик .....                          | 46 |
| 2.4.4. Сохранение выходных характеристик.....                               | 50 |
| 2.4.5. Расчёт $h_{21}$ и $h_{22}$ с помощью курсорных измерений.....        | 50 |
| 2.5. Построение семейства входных характеристик.....                        | 53 |
| 2.5.1. Подготовка схемы для исследования.....                               | 53 |
| 2.5.2. Построение характеристик.....  | 55 |
| 2.5.3. Настройка внешнего вида характеристик .....                          | 60 |
| 2.5.4. Сохранение выходных характеристик.....                               | 64 |
| 2.5.5. Расчёт $h_{11}$ и $h_{12}$ с помощью курсорных измерений.....        | 64 |

# 1. ПОСТРОЕНИЕ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРА В СРЕДЕ TINA TI

В соответствии с указаниями преподавателя выберите вариант задания, и выпишите указанный в нём тип транзистора.

Для изучения порядка построения характеристик используем транзистор BC107 (отсутствует в вариантах задания).

## 1.1. Определение предельных параметров транзистора

После получения варианта необходимо в интернете найти документ с характеристиками транзистора (datasheet). Пример для транзистора BC107 приведён на рис. 1.

При поиске необходимо учесть, что datasheet содержать характеристики нескольких транзисторов с близкими характеристиками (различающиеся, например, максимальной мощностью, так же могут быть приведены комплиментарные пары транзисторов NPN – PNP). В этом случае выбираются параметры только для транзистора из полученного варианта. Так же могут быть приведены транзисторы близких модификаций.

В сложных случаях необходимо проконсультироваться у преподавателя.

**SGS-THOMSON**  
**MICROELECTRONICS**

**BC107**  
**BC108**

## LOW NOISE GENERAL PURPOSE AUDIO AMPLIFIERS

### DESCRIPTION

The BC107 and BC108 are silicon planar epitaxial NPN transistors in TO-18 metal case. They are suitable for use in driver stages, low noise input stages and signal processing circuits of television receivers. The PNP complement for BC107 is BC177.

TO-18

### INTERNAL SCHEMATIC DIAGRAM

JA-08219

### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

| Symbol    | Parameter   | Value      |       | Unit             |
|-----------|---|------------|-------|------------------|
|           |   | BC107      | BC108 |                  |
| $V_{CE0}$ | Collector-Base Voltage ( $I_E = 0$ )  | 50         | 30    | V                |
| $V_{CE0}$ | Collector-Emitter Voltage ( $I_E = 0$ )   | 45         | 20    | V                |
| $V_{EB0}$ | Emitter-Base Voltage ( $I_C = 0$ )  | 6          | 5     | V                |
| $I_C$     | Collector Current   | 100        |       | mA               |
| $P_{tot}$ | Total Dissipation at $T_{amb} \leq 25^\circ\text{C}$<br>at $T_{case} \leq 25^\circ\text{C}$ | 0.3        |       | W                |
| $T_{stg}$ | Storage Temperature   | -55 to 175 |       | $^\circ\text{C}$ |
| $T_J$     | Max. Operating Junction Temperature   | 175        |       | $^\circ\text{C}$ |

November 1997

1/8

Рис. 1. Datasheet транзистора BC107

В найденной документации выбираются следующие параметры:

1. Максимальный ток коллектора ( $I_C$ ,  $I_{K \max}$ )
2. Максимальное напряжение коллектор-эмиттер ( $V_{CE\_}$ ,  $U_{KЭ \max}$ )
3. Максимальная рассеиваемая на коллекторе мощность ( $P_{\text{tot}}$ ,  $P_{K \max}$ )

Обычно эти параметры указываются в начале datasheet в разделе «ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS»

В datasheet транзистора BC107 эти величины приведены на первой странице в таблице ABSOLUT MAXIMUM RATINGS и равны:

$$I_{K \max} = I_C = 100 \text{ мА (Collector Current)}$$

$$U_{KЭ \max} = U_{CEO} = 45 \text{ В (Collector-Emitter Voltage)}$$

$$P_{K \max} = P_{\text{tot}} = 0.75 \text{ Вт (Total Dissipation)}$$

## 1.2. Установка программы

Для построения семейства выходных характеристик воспользуемся программой TINA TI. Программа бесплатно распространяется фирмой Texas Instruments и находится по ссылке <http://www.ti.com/tool/tina-ti>. Программа имеет русифицированную версию (рис. 2).

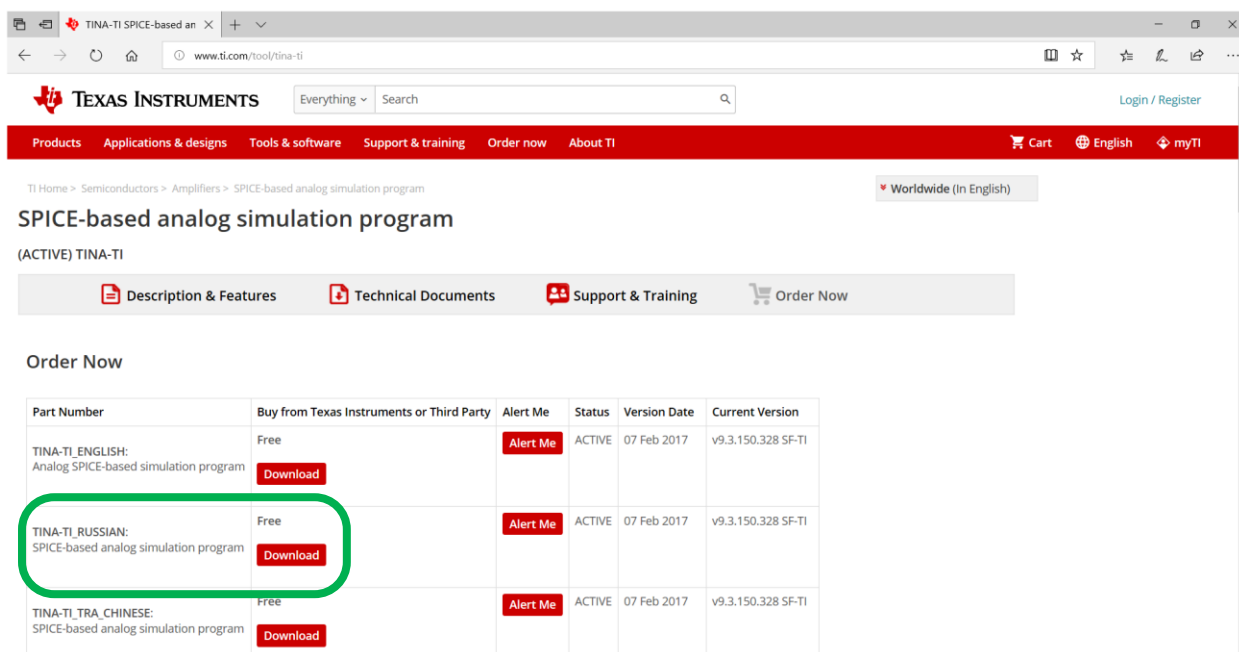


Рис. 2. Страница программы TINA TI на сайте фирмы Texas Instruments (<http://www.ti.com/tool/tina-ti>)

### 1.3. Построение характеристик

#### 1.4. Построение семейства выходных характеристик

##### 1.4.1. Подготовка схемы для исследования

Соберём в программе Tina Ti схему для получения выходных характеристик транзистора. Для начала расположим на рабочем поле транзистор. Для этого выберем вкладку «Полупроводники» (рис. 3, позиция 1), затем выбираем биполярный транзистор npn типа (одно нажатие на пиктограмме, рис. 3, позиция 2), после чего располагаем транзистор в выбранном месте рабочего поля (рис. 3, позиция 3).

Следующим шагом нужно выбрать тип транзистора, для этого двойным щелчком на транзисторе вызываем окно установки свойств транзистора вызываем меню выбора типа транзистора (рис. 3, позиция 4), после чего выбираем заданный в задании тип транзистора (рис. 3, позиция 4).

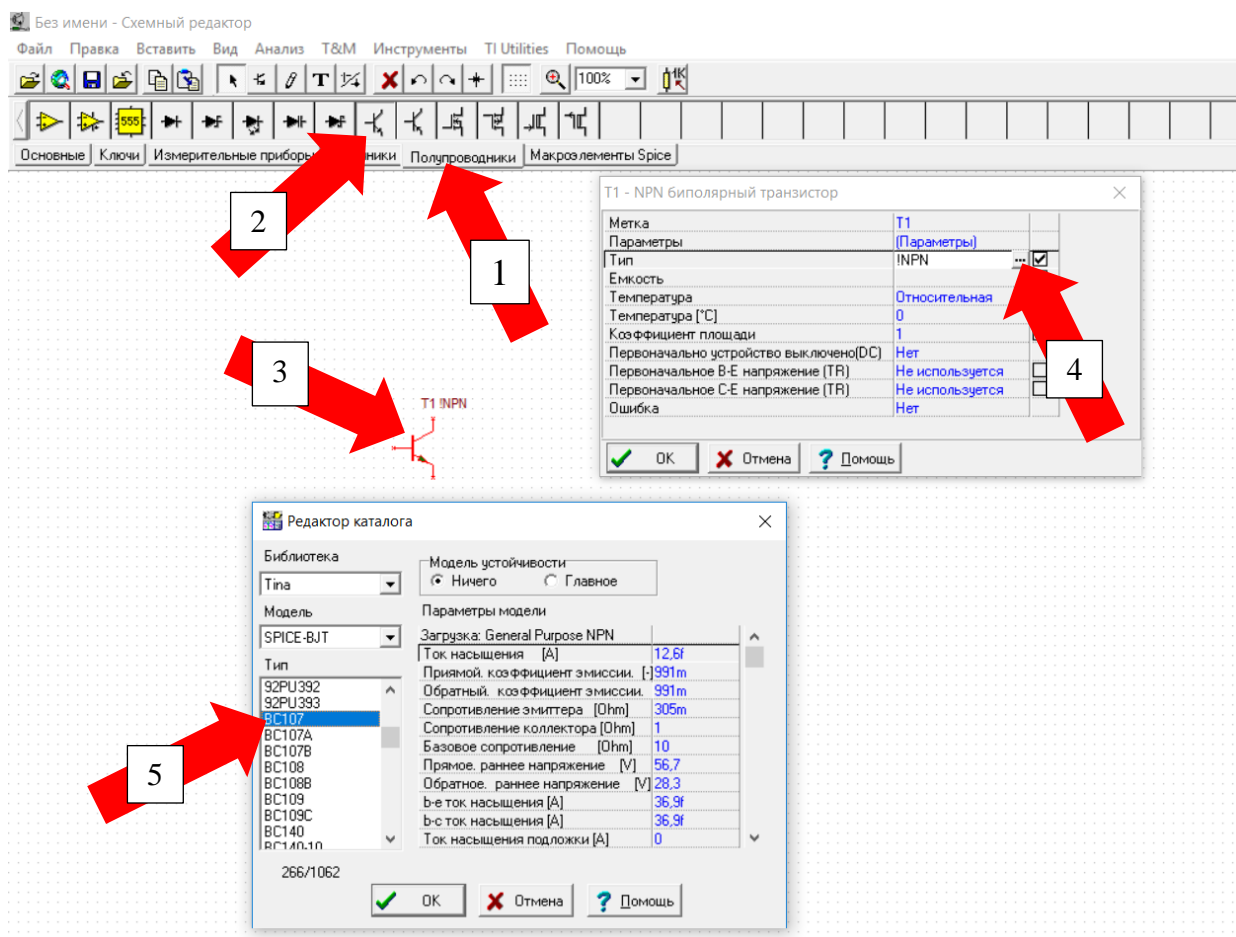


Рис. 3. Подготовка схемы для исследования выходных характеристик.  
Выбор транзистора.

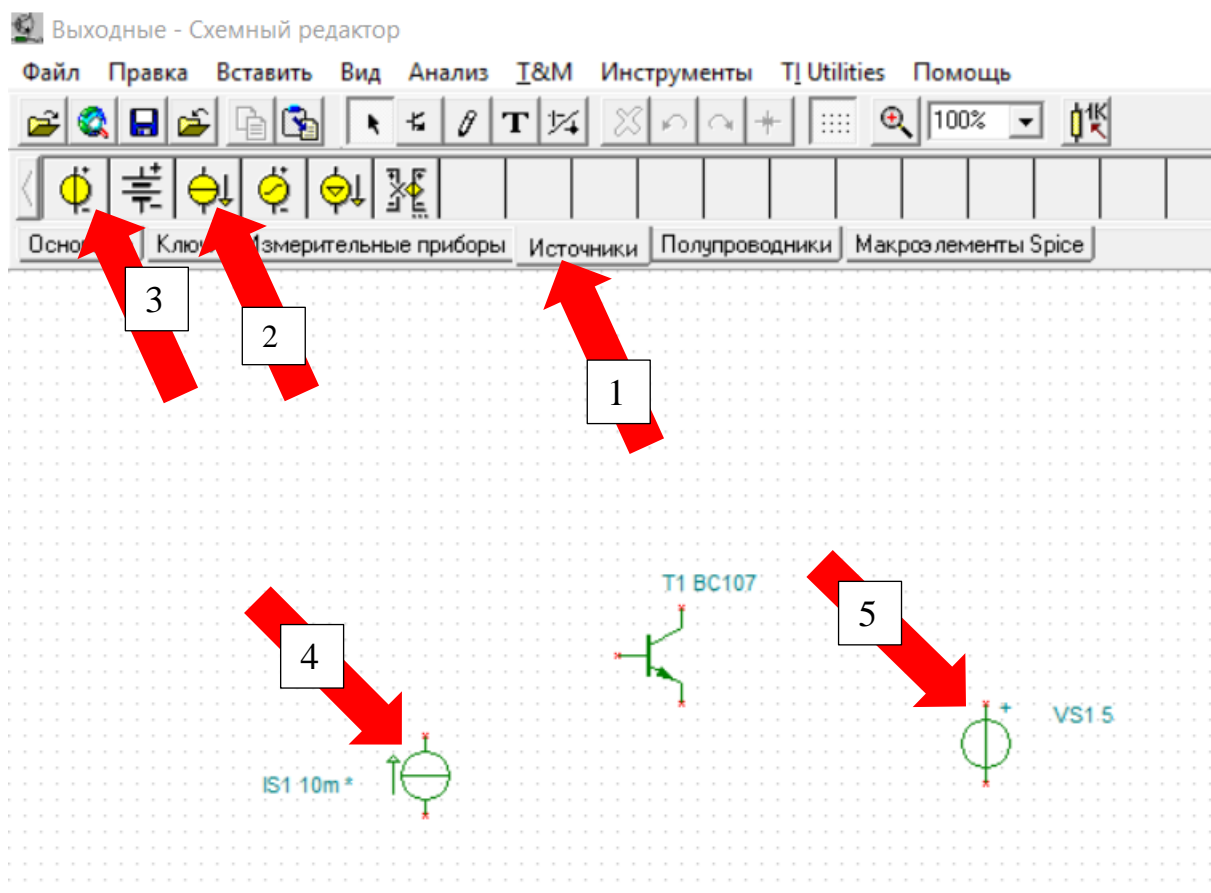
Затем добавим в схему источник тока (в цепи базы), амперметр и источник напряжения в цепи коллектора.

Источники расположены на вкладке «Источники» (рис. 4, позиция 1), Источник тока показан на позиции 2, источник напряжения – позиция 3 на рисунке 4.

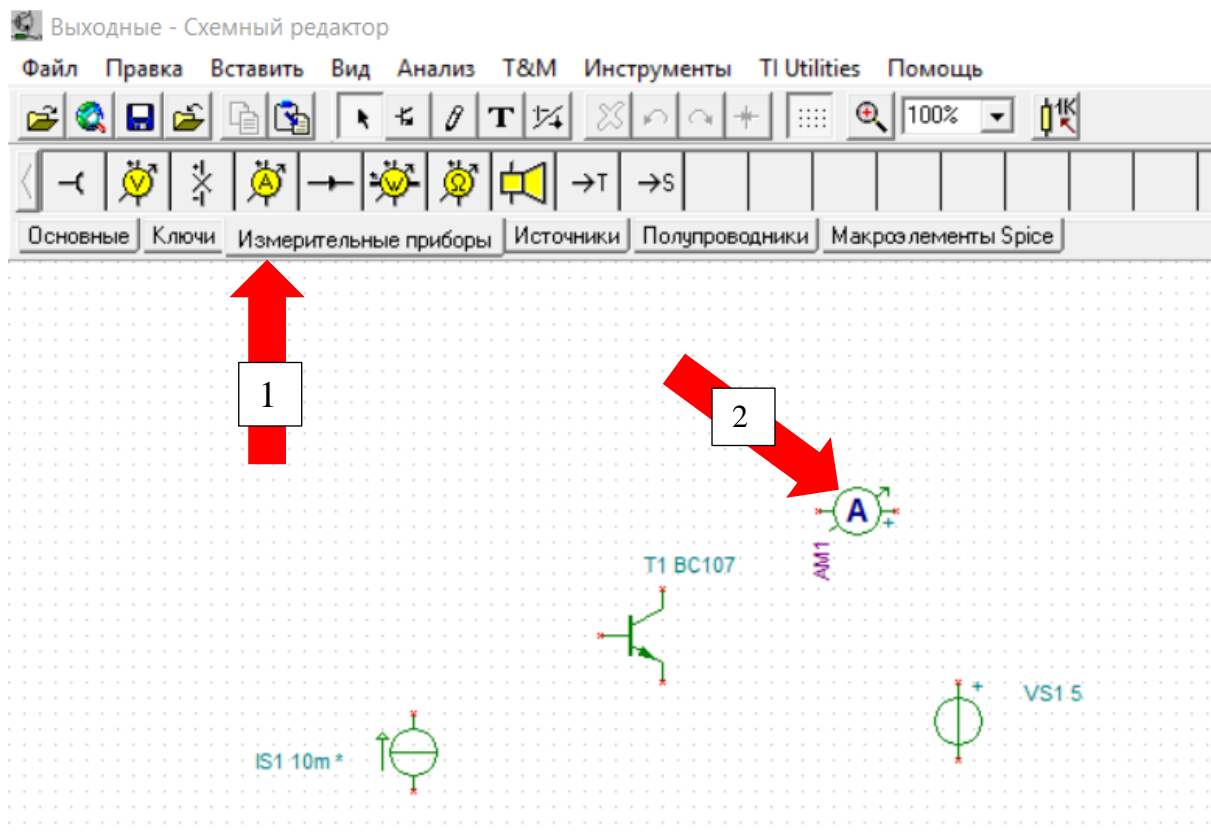
Расположение источников показано на рисунке 4, позиции 4 и 5.

**Обратите внимание на направление тока в источнике тока (стрелка сбоку от источника, рис. 4 поз. 4), и полярность источника напряжения (знак плюс («+»)) с краю источника, рис. 4 поз. 5).** Полярность источников определяется типом транзистора.

Для удобного подключения источников, с учётом полярности, их нужно будет нужно повернуть вокруг своей оси, для этого выделяем прибор мышью, а затем нажимаем комбинацию клавиш «**Ctrl – R**» необходимое количество раз.



*Рис. 4. Подготовка схемы для исследования выходных характеристик.  
Выбор источников.*



*Рис. 5. Подготовка схемы для исследования выходных характеристик.  
Выбор амперметра.*

Добавим в схему амперметр. Для этого выберем амперметр на вкладке «Измерительные приборы» (рис. 5, поз. 1). Расположим его в цепи коллектора с учётом направления тока (знак плюс «+» амперметра должен быть направлен к «+» источника, поворачиваем с помощью «Ctrl – R»).

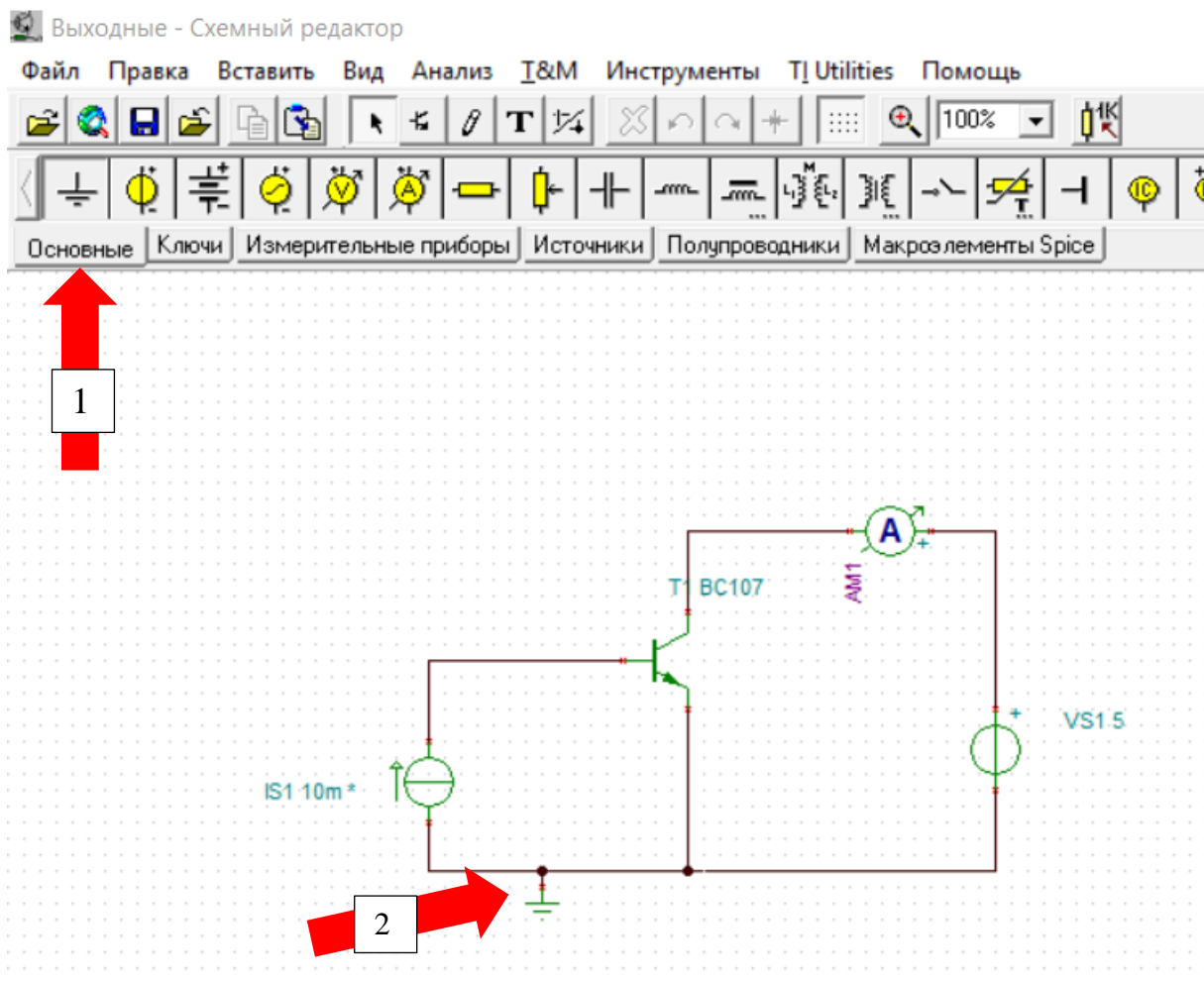


Рис. 6. Подготовка схемы для исследования выходных характеристик.  
Завершение сборки схемы.


Для завершения сборки схемы соединим все элементы проводниками, для чего нужно подвести указатель мыши к выводу и при изменении вида указателя нажать правую кнопку мыши, затем провести проводник до другого вывода.

Схема соединений приведена на рис. 6.

В заключении добавим общий вывод («Земля»), который расположен на вкладке «Основные» (рис. 6, поз. 1). Располагаем «Землю» в цепи эмиттера (рис. 6, поз. 2).

#### 1.4.2. Построение выходных характеристик

Для построения выходных характеристик нужно сделать источник тока IS1 (находится в цепи базы) управляемым объектом.

Для этого нужно выбрать пиктограмму  (рис. 7), что приведёт к изменению формы курсора, а затем выбрать прибор, параметры которого будут изменяться (в нашем случае это источник IS1)

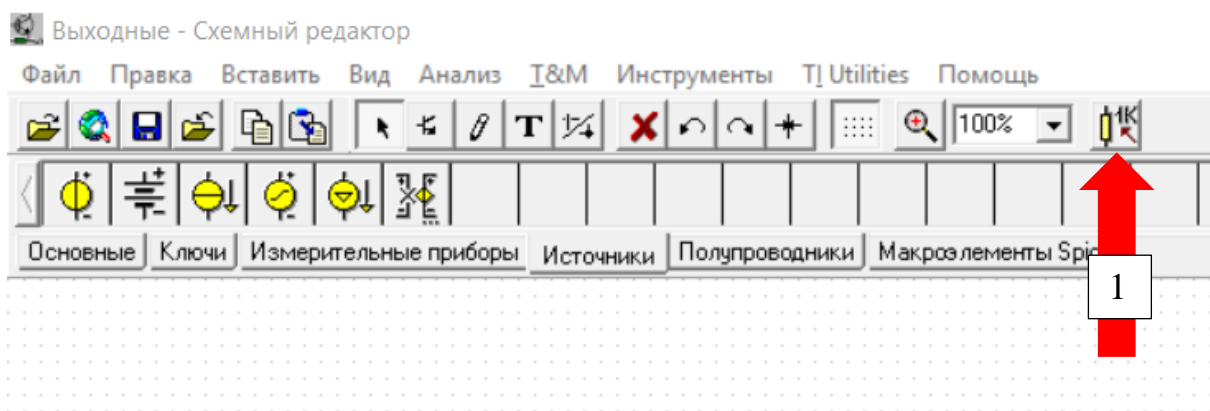


Рис. 7. Пиктограмма включения режима выбора объекта управления

После выбора объекта управления (у нас это IS1) появится меню настройки параметров (рис. 8, поз. 1), нажав кнопку «Выбрать...» (рис. 8, поз. 2), мы увидим окно выбора режима изменения тока базы. Для первой итерации расчёта оставим эти значения без изменений и закроем окно (нажать кнопку «ОК»).

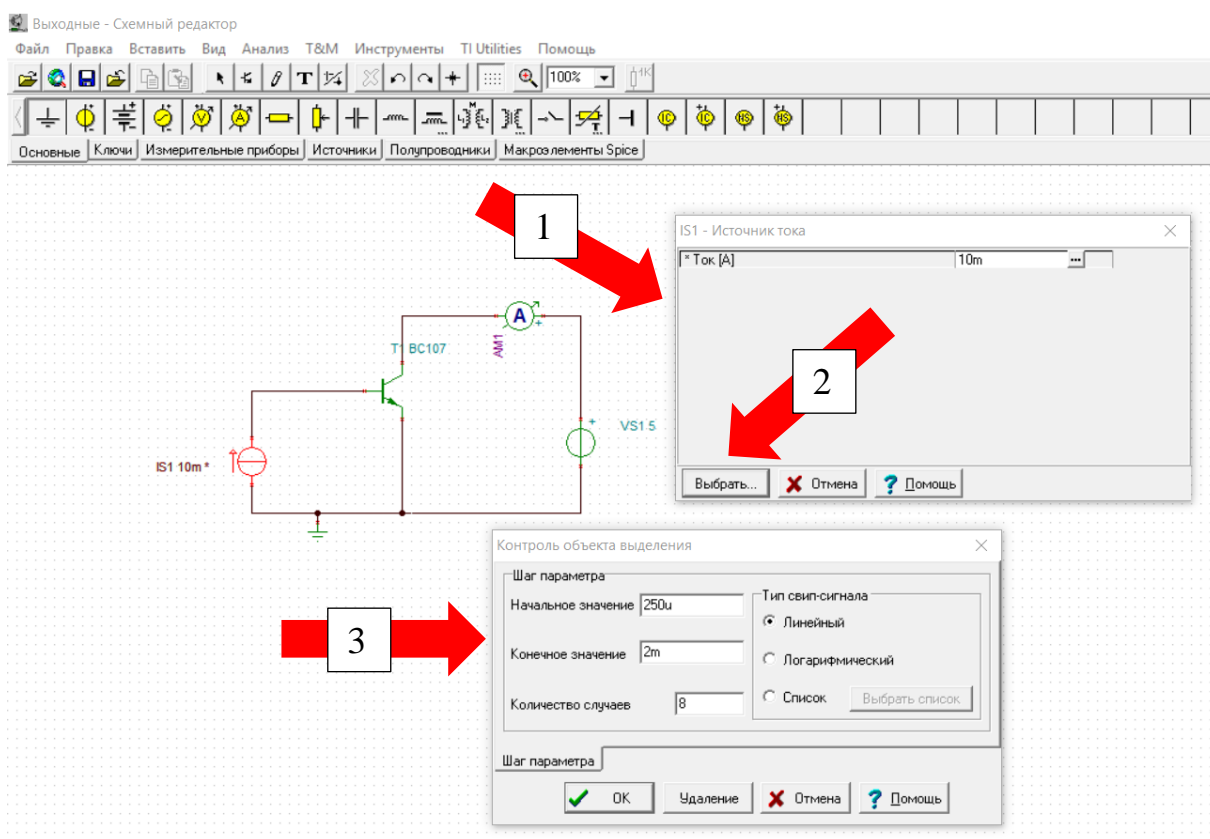


Рис. 8. Настройка диапазона изменения тока базы

Проведём первую итерацию расчёта, для чего выберем пункты меню *Анализ* → *Анализ постоянного тока* → *Передаточная характеристика постоянного тока* (рис. 9).

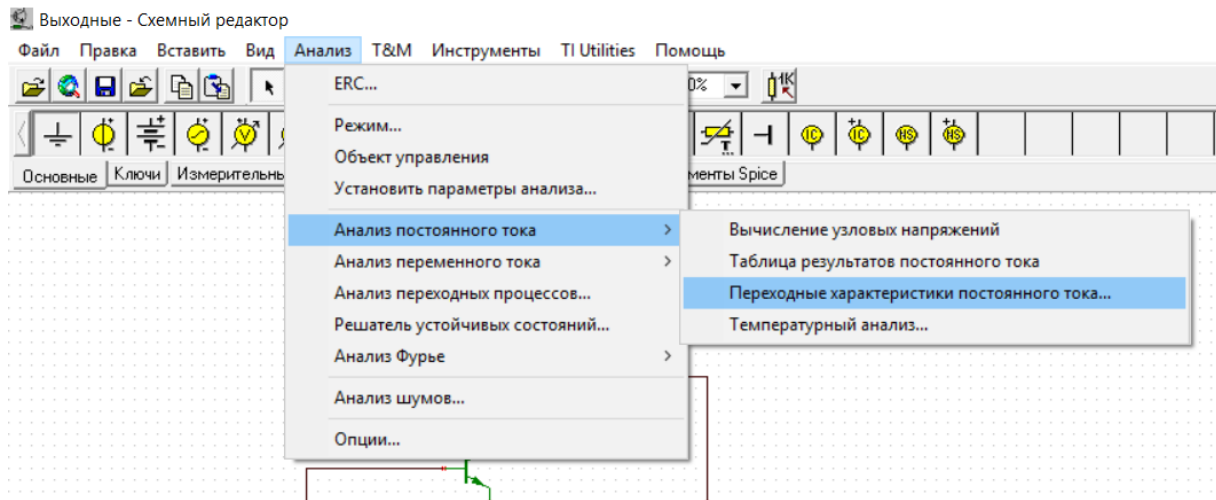


Рис. 9. Запуск расчёта характеристики

В результате откроется меню настройки диапазона изменения напряжения источника напряжения в цепи коллектора (VS1 если в поле «Ввод» указан другой источник, это необходимо исправить) (рис. 10).

Начальное значение должно быть равно нулю, конечное значение немного превышать максимальное напряжение коллектор – эмиттер ( $U_{кэmax}$ ), из datasheet (в нашем примере оно равно 45 В, выберем значение 50 В).

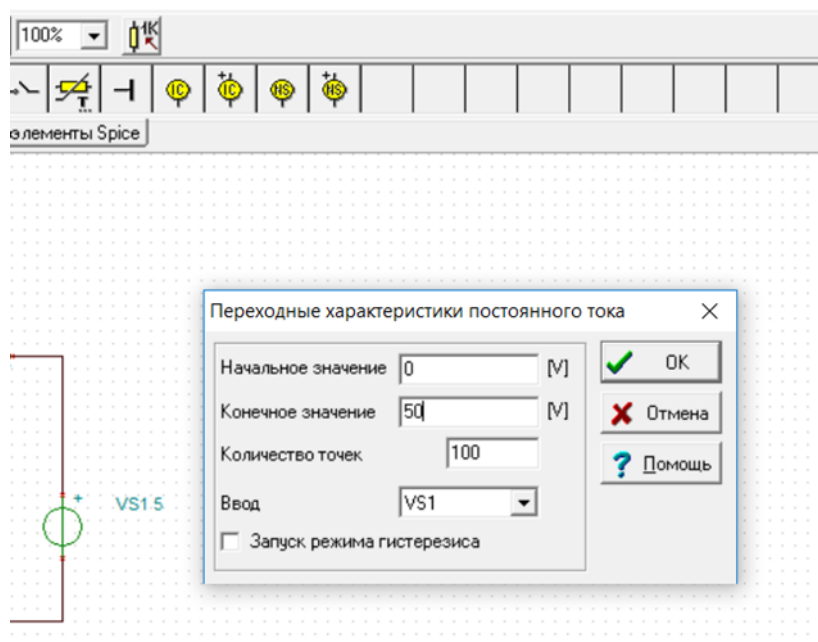


Рис. 10. Запуск расчёта характеристики

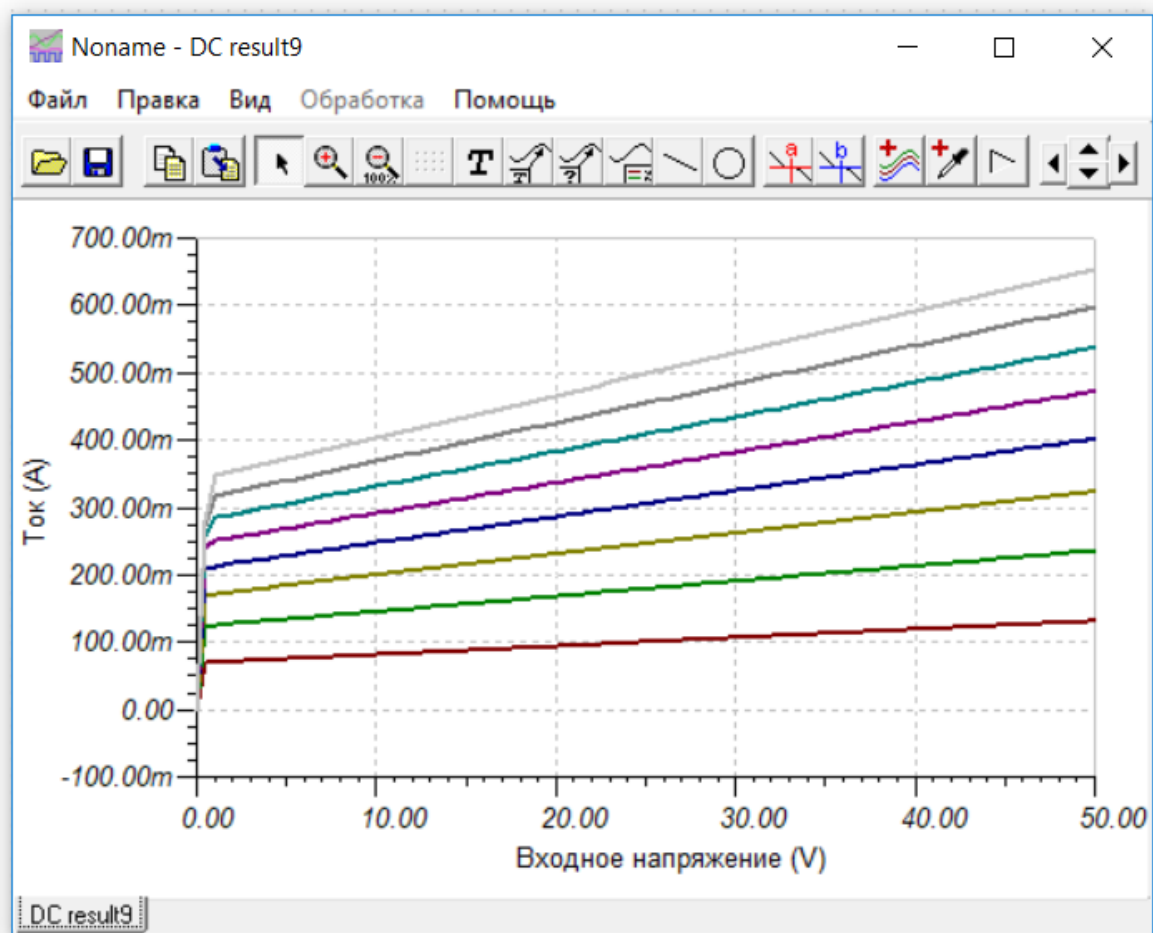

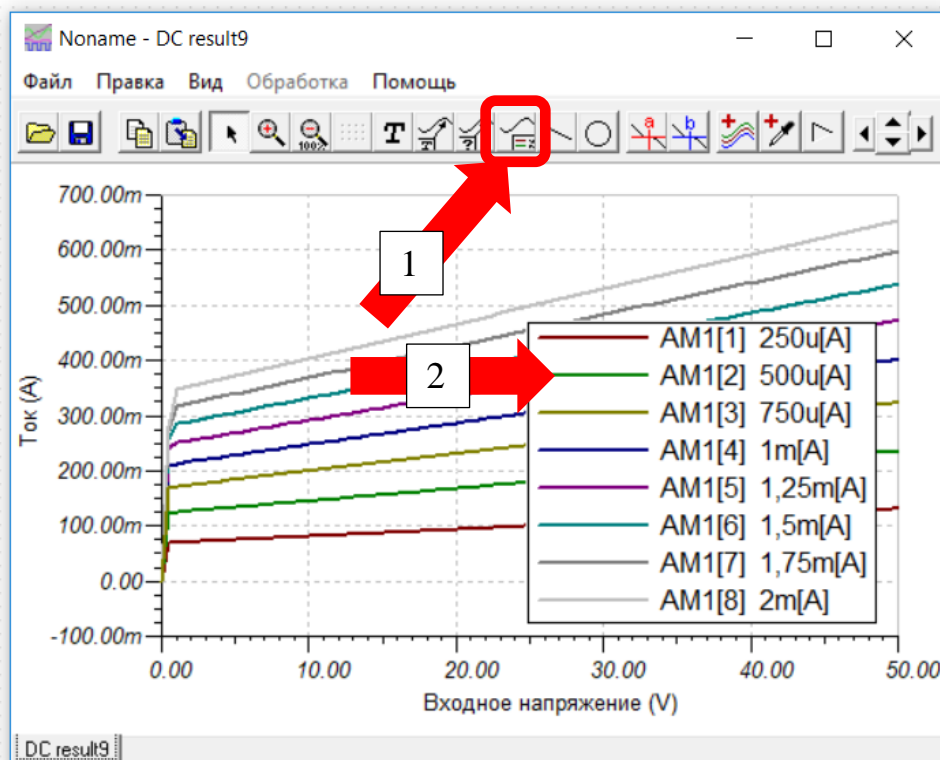


Рис. 11. Результат первой итерации расчёта выходных характеристик

После запуска расчёта получим график с выходными характеристиками транзистора (рис. 11).

По вертикальной оси у нас отложен ток коллектора, и сравнив его с  $I_{K \max} = 100 \text{ мА}$  мы видим, что верхние характеристики находятся значительно выше этого значения ( $\sim 350 \text{ мА}$ ), что усложняет дальнейшие расчёты. По графикам видно, что  $I_K = 100 \text{ мА}$  находится между 1 и 2 характеристиками, следовательно, максимальный ток базы, для которого проводится расчёт, должен быть меньше  $I_{b2}$ . Для того, чтобы узнать его величину нужно кнопкой с пиктограммой  включить отображение легенды (рис. 12, поз. 1.). На легенде мы видим, что второй кривой соответствует ток  $I_{b2} = 500 \text{ мкА}$  (рис. 12, поз. 1.).



**Сохрани в черновик!**

Рис. 12. Настройка диапазона изменения тока базы

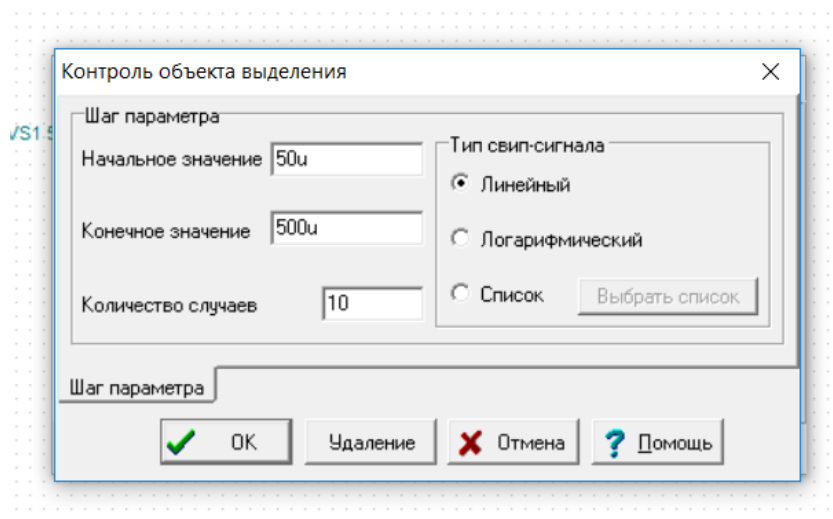
По результатам проведённого анализа скорректируем параметры изменения входного тока (вызов меню показан на рис. 7 и 8, Выбор объекта управления).

С учётом выбранного максимального тока базы  $I_{б\max} = I_{б2} = 500 \text{ мкА}$ , выберем начальное значение 50 мкА, количество шагов 10 (рис. 13).

**Важно:** для дальнейшей работы удобно сохранить значения, которые использовались для построения характеристик, а также другие промежуточные данные, их рекомендуется сохранять в черновике, для чего нужно сделать копию экрана (скриншот) клавишей «PrtScr», а затем вставить его в файл черновика в текстовом редакторе.

В него же рекомендуется выписать предельные параметры транзистора из datasheet ( $I_{К\max}$ ,  $U_{КЭ\max}$ ,  $P_{К\max}$ ).

Данные, которые рекомендуется сохранить будут помечены меткой **«Сохрани в черновик!»**



**Сохрани**  
**В**  
**черновик!**

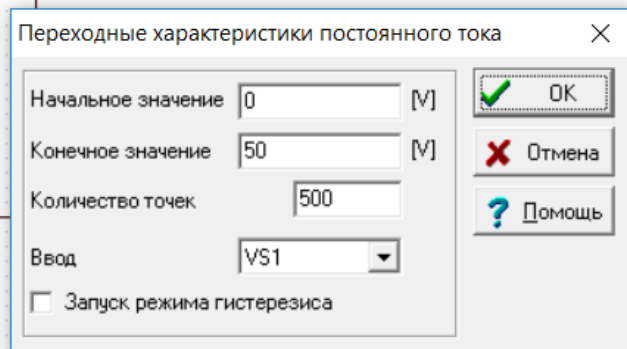
*Рис. 13. Настройка диапазона изменения тока базы*

Выбор значений для расчёта выходных характеристик является творческим процессом и сильно зависит от транзистора, в результате мы должны получить семейство выходных характеристик, ограниченных предельными параметрами тока и напряжения коллектора ( $I_{kmax}$  и  $U_{kэ max}$ ).

Для получения оптимальных характеристик может потребоваться несколько итераций расчётов, в которых необходимо подобрать оптимальные значения изменения тока базы («Начальное значение», «Конечное значение» и «Количество случаев» (количество выходных характеристик) рис. 13).

Также нужно учитывать удобство использования полученного графиков в дальнейших построениях.

Перейдём к построению выходных характеристик (*Анализ → Анализ постоянного тока → Передаточная характеристика постоянного тока* рис. 9, 10). Отметим, что выходные характеристики, в области низких входных напряжений, имеют ломаный характер, что обусловлено малым шагом их расчёта, для исправления этого Установим шаг («Количество точек») равным 500 (рис. 14)



**Сохрани**  
**В**  
**черновик!**

Рис. 14. Настройка шага изменения  $U_{кз}$  при расчёте выходных характеристик

Полученные в результате расчёта характеристики приведены на рис. 15.

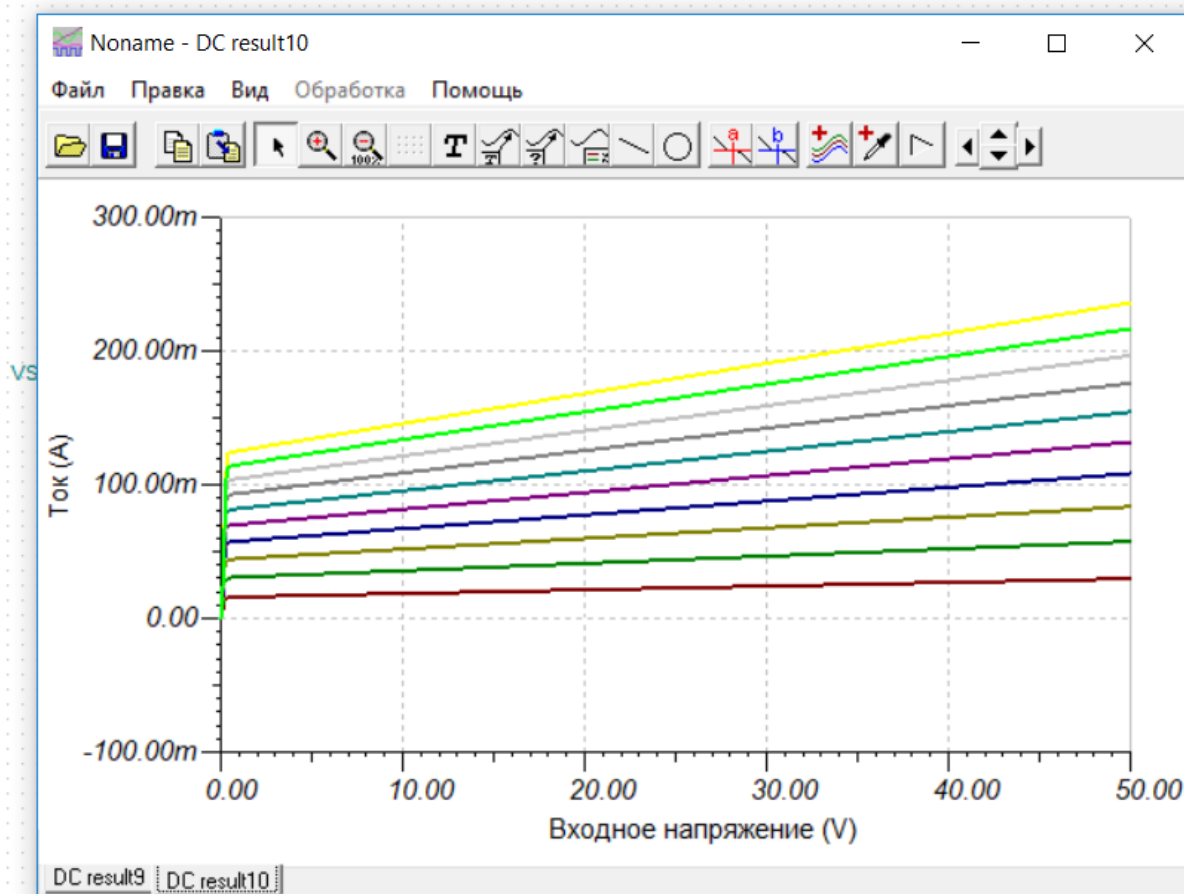
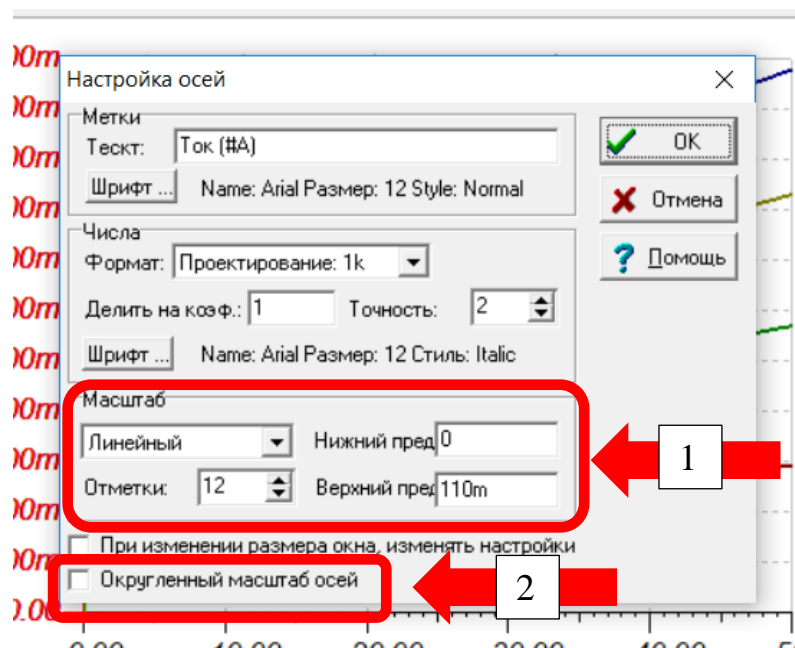


Рис. 15. Выходные характеристики

Полученные характеристики неудобны для дальнейшей работы т.к. имеют значительные пустые пространства сверху (выше  $I_k \max = 100 \text{ mA}$ ) и снизу (менее  $0 \text{ mA}$ ), для коррекции отображения характеристик, двойным нажатием мыши на вертикальную ось (тока) откроем окно «Настройка осей» (рис. 16).

При настройке внешнего вида оси сначала снимем отметку с пункта «Округление масштаба осей» (рис. 16, поз. 2, корректирует параметры меток и пределов на оси без учёта внесённых правок). Затем внесём изменения в параметры группы «Масштаб» (рис. 16, поз. 1):

- «Нижний предел» установим равным нулю
- «Верхний предел» установим равным немного больше  $I_k \max$ , установим **110m** (для рассматриваемого варианта  $I_k \max = 100 \text{ mA}$ , отсюда примем верхний предел равным **110m**)
- «Отметки» равны количеству делений на оси с учётом нулевого значения установим **12 делений** (для нашего варианта удобно взять 11 делений плюс нулевая отметка, **итого 12 делений**)



**Сохрани**  
**В**  
**черновик!**

Рис. 16. Настройка внешнего вида выходных характеристик

В итоге выходные характеристики примут вид, представленный на рис. 17.

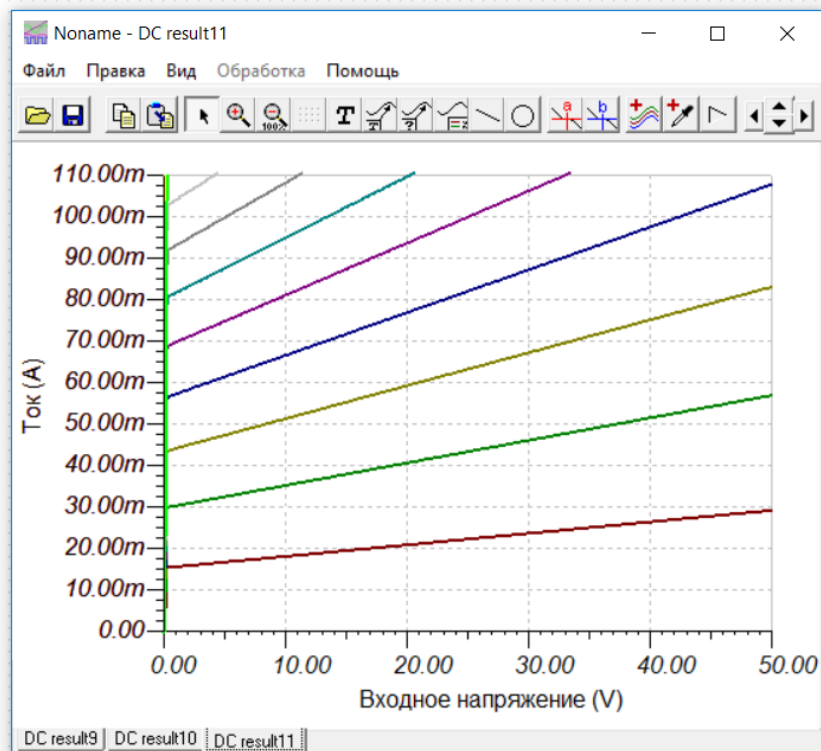
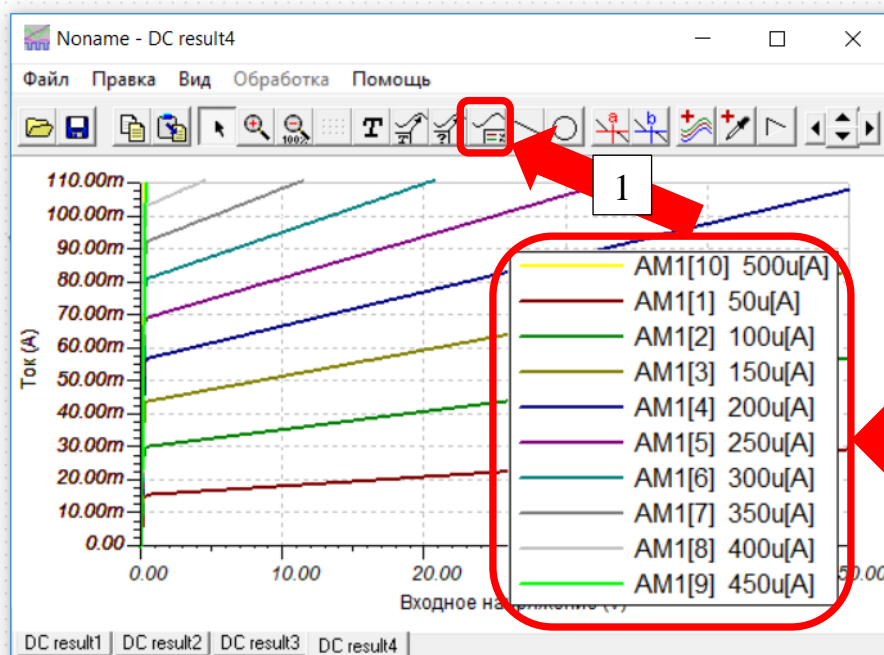


Рис. 17 Итоговый вид выходных характеристик



**Сохрани**  
**В**  
**черновик**  
**!**

Рис. 18 Легенда

Токи базы, для которых построены выходные характеристики

Для дальнейших расчётов нужно сохранить значения токов базы, для которых были построены выходные характеристики. Нажмём кнопку вызова легенды (рис. 18, поз. 1), а за тем расположим легенду в области графика. В последствии её можно будет удалить, выбрав курсором мыши и нажав клавишу «Esc».

Сохраним полученную характеристику для дальнейшего анализа. Перед сохранением исправим названия осей, для этого сделаем двойной щелчок на вертикальной оси и в разделе «Метки», в поле «Текст» (находится вверху появившегося окна) введём новое название оси – «Ток коллектора,  $I_k$  (#A)» (рис. 19).

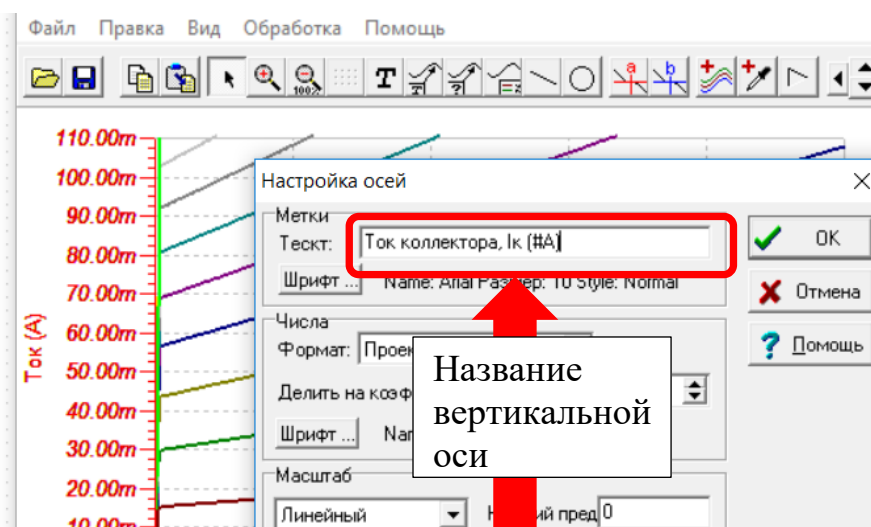


Рис. 19 Изменение названия вертикальной оси

Аналогично изменим название горизонтальной оси на «Напряжение коллектор-эмиттер,  $U_{кэ}$ (#V)» (рис. 20)

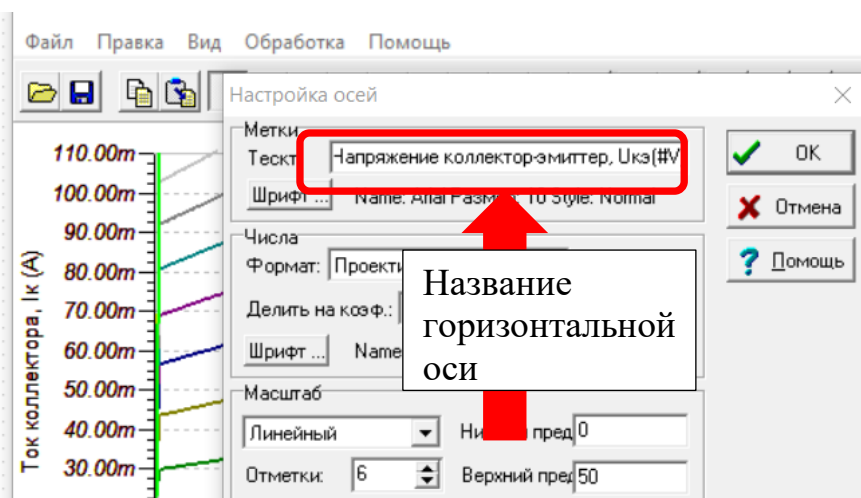


Рис. 20. Изменение названия горизонтальной оси

Затем скопируем полученные характеристики в буфер обмена с помощью кнопки «Копировать» (рис. 21)

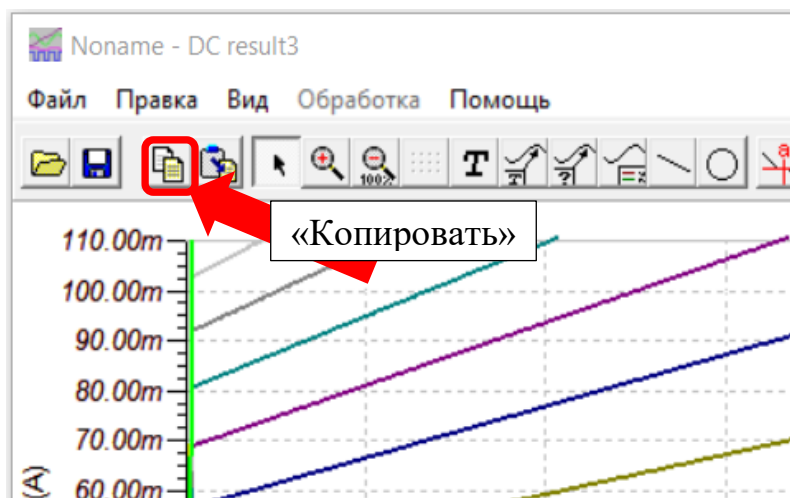


Рис. 21. Кнопка «Копировать»

Полученный результат вставим в отчёт (рис. 22). Вставленный рисунок может иметь пустые пространства справа и снизу, их нужно удалить с помощью функции «Обрезка» текстового редактора

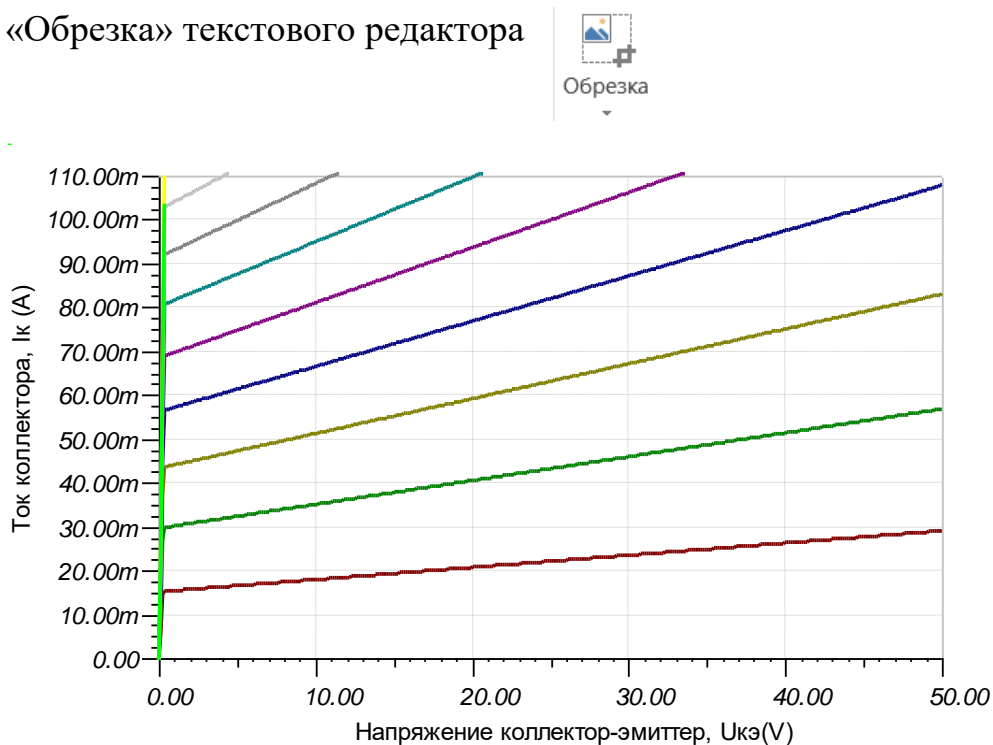






Рис. 22. Итоговый вид выходных характеристик

### 1.4.3. Расчёт h-параметров по выходным характеристикам

Курсорные измерения являются стандартной функцией цифровых осциллографов и заключаются в перемещении по экрану двух меток, в местах пересечения этих меток с графиками считываются значения и отображаются в отдельном экране.

Для включения курсорных измерений необходимо нажать кнопки  и  (рис. 23, поз. 1). После нажатия кнопки курсор изменит свою форму и нужно будет выбрать характеристику для которой будут проводиться измерения. Положение курсоров можно изменять перемещая метки курсоров  и  в верхней части графика. В результате мы получим две пары перпендикулярных линий (рис. 23, поз. 2 и 3), кроме того, появится окно с координатами и разницей между ними (рис.23. поз. 4).

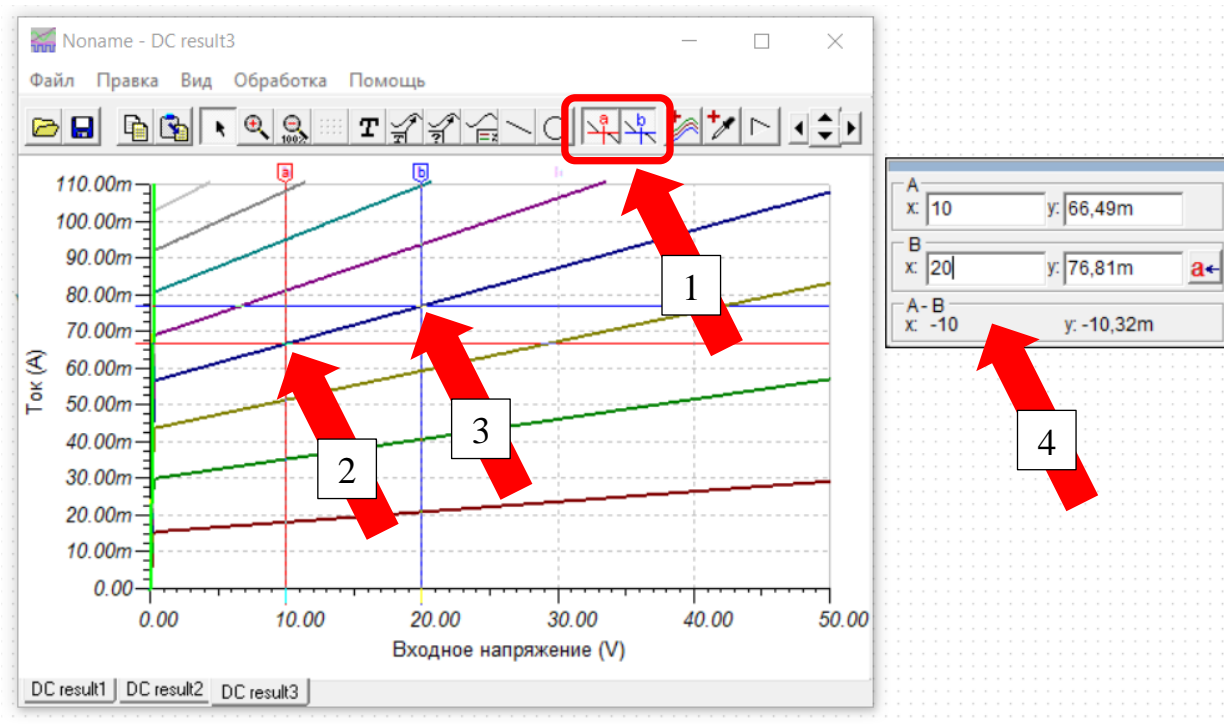


Рис. 23. Курсорные измерения на выходных характеристиках

Окно с координатами (рис. 24) очень удобно для расчёта h-параметров. В этом окне мы видим поля с координатами «x» и «y» точек курсоров (рис. 24, поз. 1 и 2). В эти поля можно вводить желаемые координаты курсоров.

**Важно: ввод координат надо подтверждать клавишей «Enter»**

Под областью ввода координат показана разница между ними – ( $x_A - x_B$ ) (рис. 24, поз. 3) и ( $y_A - y_B$ ) (рис. 24, поз. 4)

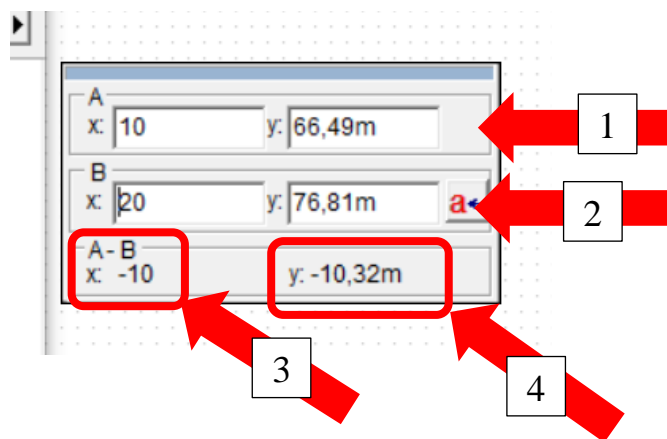


Рис. 24. Курсорные измерения

#### 1.4.4. Расчёт $h_{22}$

Параметра  $h_{21}$  рассчитывается по следующему выражению:

$$h_{22} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{KЭ}} \right|_{I_6 = \text{const}}$$

Воспользуемся ранее рассмотренным примером для курсорных измерений (рис. 25). В данном примере току соответствует координата «у», а напряжению – «х». В окне параметров мы видим соответствующие значения токов и напряжений, а также их разницы:

|          | Точка «a» | Точка «b» | $\Delta$  |
|----------|-----------|-----------|---|
| $U_{KЭ}$ | 10 В      | 20 В      | $\Delta U_{KЭ} = U_{KЭb} - U_{KЭa} = 20В - 10В = 10В$                             |
| $I_K$    | 66,79 мА  | 76,81 мА  | $\Delta I_K = I_{Kb} - I_{Ka} = 76,81\text{мА} - 66,49\text{мА} = 10,32\text{мА}$ |

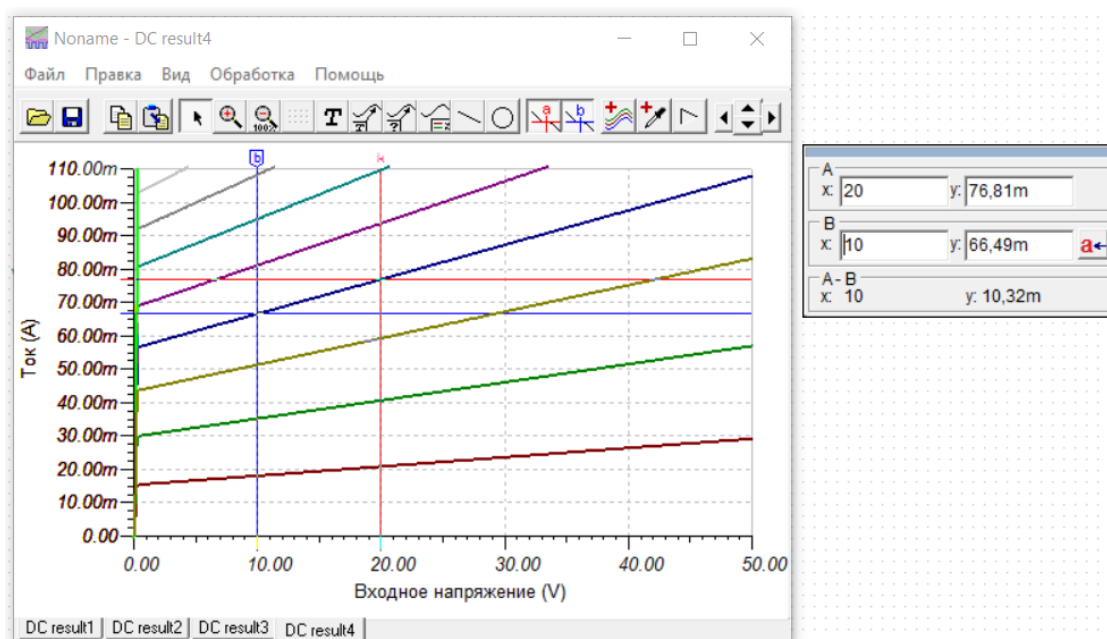


Рис. 25. Расчёт  $h_{22}$


В итоге получим:

$$h_{22} = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{КЭ}} = \frac{76,81 \text{ мА} - 66,49 \text{ мА}}{20 \text{ В} - 10 \text{ В}} = \frac{10,32 \text{ мА}}{10 \text{ В}} = 1,032 \text{ мСм}$$

#### 1.4.5. Расчёт $h_{21}$

Параметра  $h_{21}$  рассчитывается по следующему выражению

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

Для расчёта  $h_{21}$  нам нужно измерить  $I_K$  на двух соседних характеристиках. Для этого нужно дважды нажать кнопку выбора курсора «b»  и установить курсор на соседнюю характеристику (рис. 26. Видно, что вертикальные линии курсоров слились, т.к. у них одинаковое значение по оси «х»).

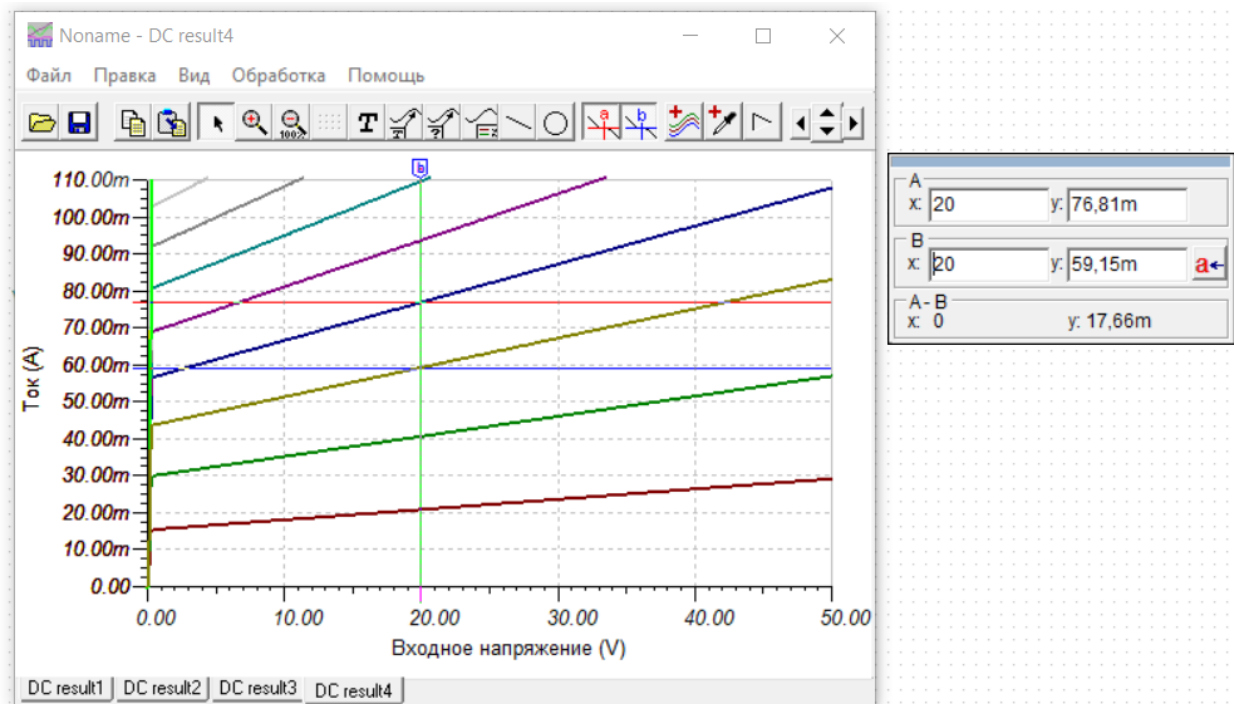


Рис. 26. Расчёт  $h_{21}$

Вертикальные линии курсоров слились, т.к. у них одинаковое значение по оси «х» ( $U_{КЭ} = \text{const} = 20\text{В}$ )

Величина  $\Delta I_B$  определяются по легенде на рис. 18. На ней видно, что величина токов базы, соответствующие характеристикам для которых мы проводим расчёт, равны 200 мкА для курсора «a» и 150мкА для курсора «b».

В итоге получим:

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \right|_{U_{KЭ} = const} = \frac{76,81 \text{ мА} - 59,15 \text{ мА}}{200 \text{ мкА} - 150 \text{ мкА}} \bigg|_{U_{KЭ} = 20 \text{ В}} = \frac{17,66 \text{ мА}}{50 \text{ мкА}} = 353$$

## 1.5. Построение семейства входных характеристик

### 1.5.1. Подготовка схемы для исследования

Для построения входных характеристик необходимо собрать схему, приведённую на рис. 27.

Схема строится аналогично рассмотренной ранее схеме для расчёта выходных характеристик.

При построении не забудьте заменить транзистор по умолчанию на заданный в полученном варианте.

Обратите внимание на полярность включения источников напряжения («плюс» в сторону базы и коллектора, «минус» в сторону общего вывода) и амперметра («полюс» в сторону источника VS1).

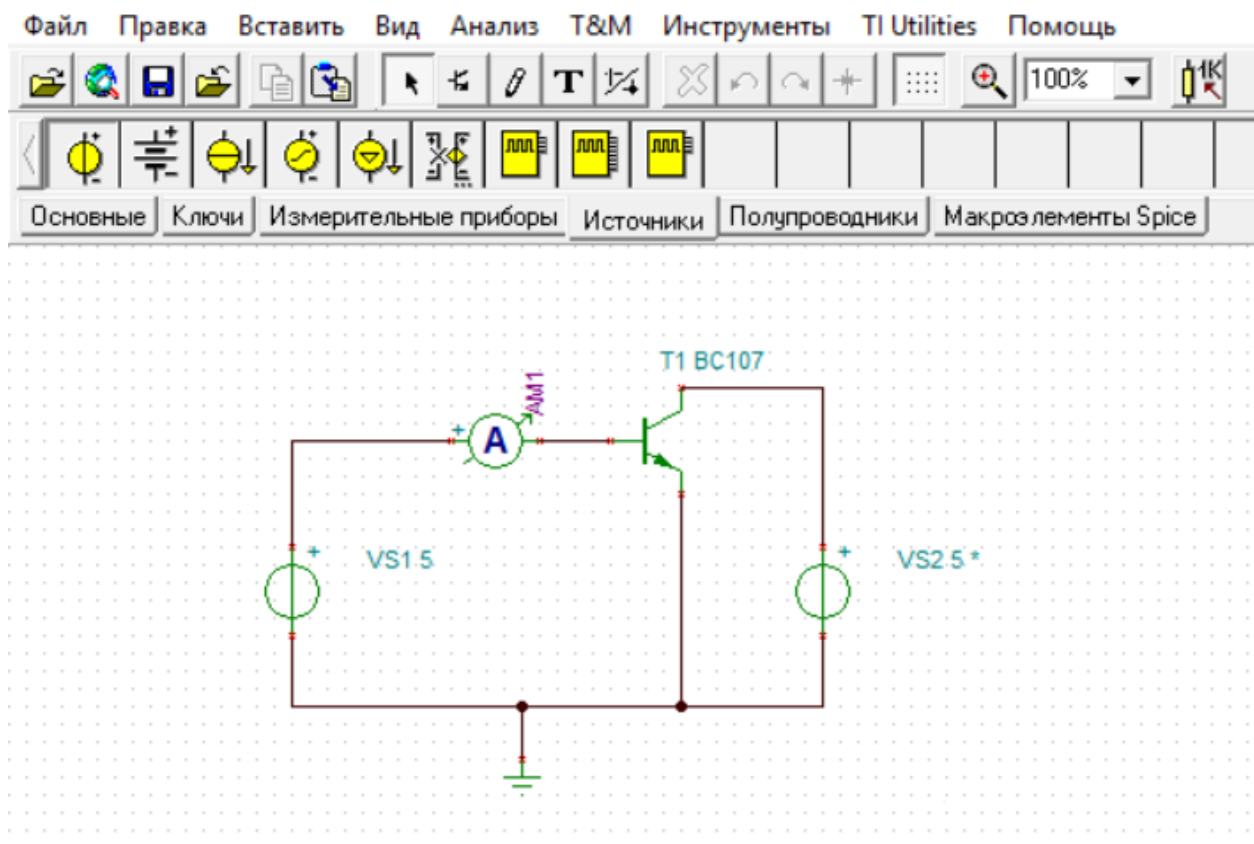



Рис. 27. Схема для построения входных характеристик транзистора

### 1.5.2. Построение входных характеристик

Для построения выходных характеристик нужно сделать источник напряжения VS2 (находится в цепи коллектора) управляемым объектом.

Для этого нужно выбрать пиктограмму  (рис. 27), что приведёт к изменению формы курсора, а затем выбрать прибор, параметры которого будут изменяться (в нашем случае это источник VS2)

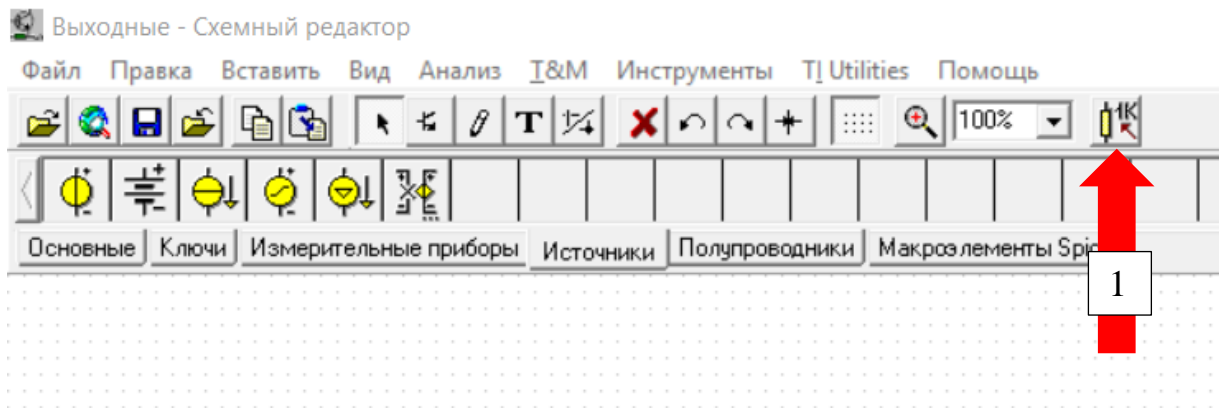
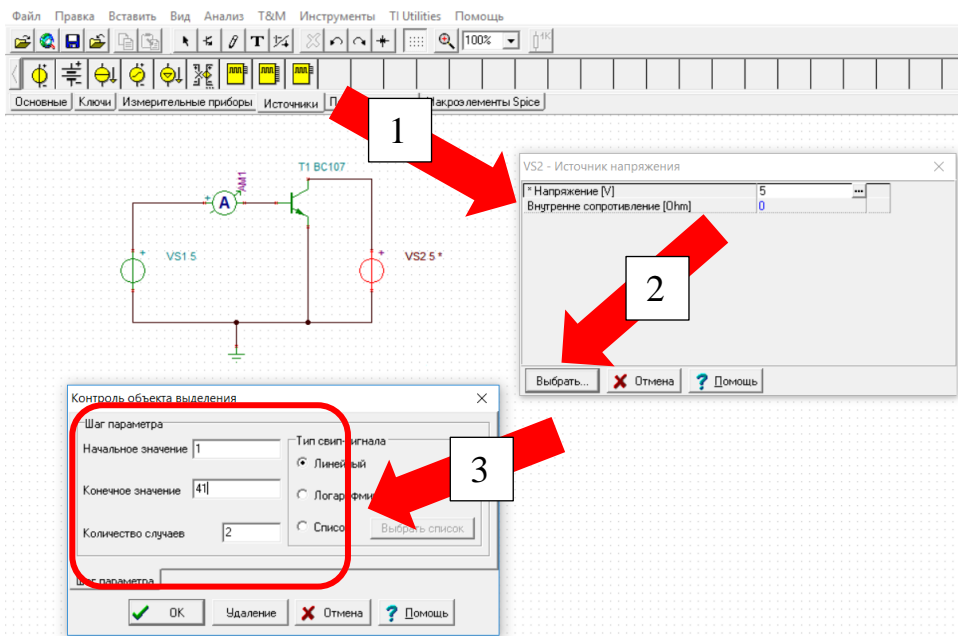


Рис. 27. Пиктограмма включения режима выбора объекта управления

После выбора объекта управления (у нас это VS2) появится меню настройки параметров (рис. 28, поз. 1), нажав кнопку «Выбрать...» (рис. 28, поз. 2), мы увидим окно выбора режима изменения напряжения коллектор-эмиттер.

Традиционно строится две входные характеристики для напряжений коллектора 0 и 5 В, в нашем случае выбраны значения 1 и 41 В. Значение 1 В выбрано из-за того, что характеристика при  $U_{кэ} = 0$  В имеет неудобный вид. Значение  $U_{кэ} = 41$  В выбрано близким к  $U_{кэ \max}$  (равно 45 В) для удобства дальнейших построений, т.к. при малых значениях выходные характеристики будут расположены очень близко друг к другу что усложнит дальнейшие расчёты и построения. Мы строим две характеристики, поэтому «Количество случаев» оставим равным двум.



**Сохрани**  
**в**  
**черновик!**

Рис. 28. Настройка диапазона изменения напряжения коллектор-эмиттер

Проведём первую итерацию расчёта, для чего выберем пункты меню *Анализ* → *Анализ постоянного тока* → *Передаточная характеристика постоянного тока* (рис. 29).

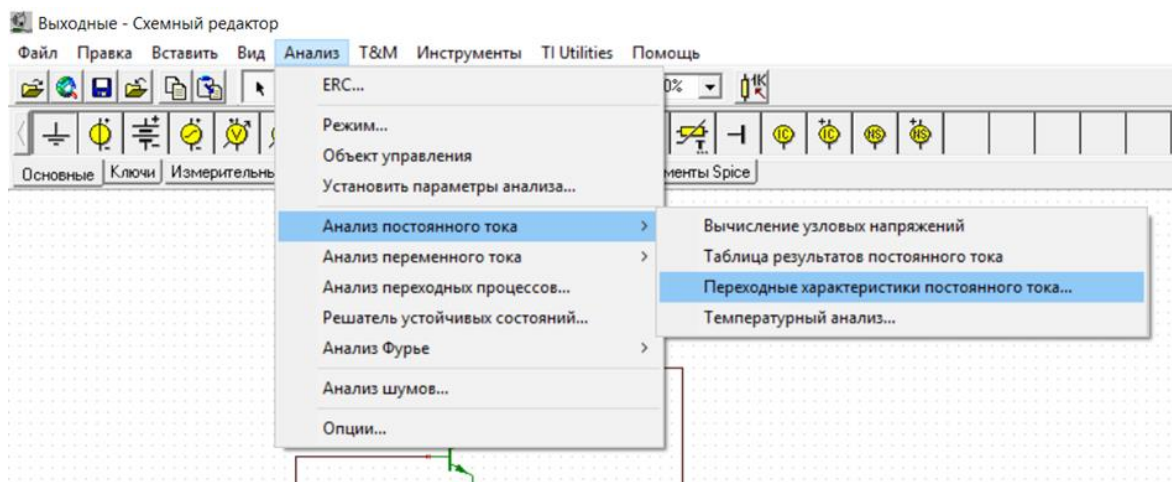


Рис. 29. Запуск расчёта характеристики

В результате откроется меню настройки диапазона изменения напряжения источника напряжения в цепи базы (VS1 если в поле «Ввод» указан другой источник, это необходимо исправить) (рис. 30).

Начальное значение должно быть рано нулю, конечное значение определим экспериментально, для первого расчёта значения 1 В оптимально.

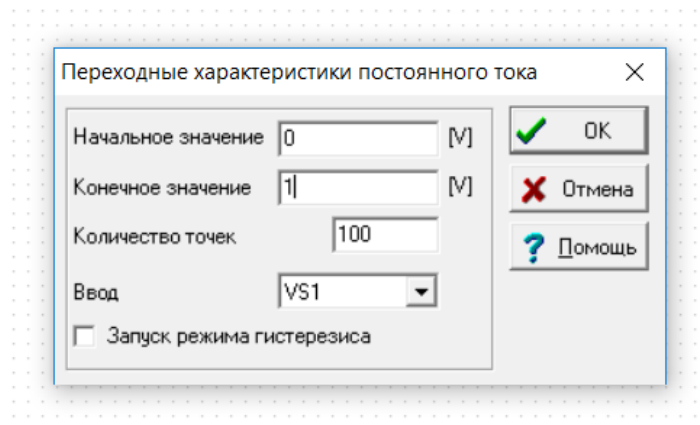


Рис. 30. Запуск расчёта характеристики

После запуска расчёта получим график с входными характеристиками транзистора (рис. 31).

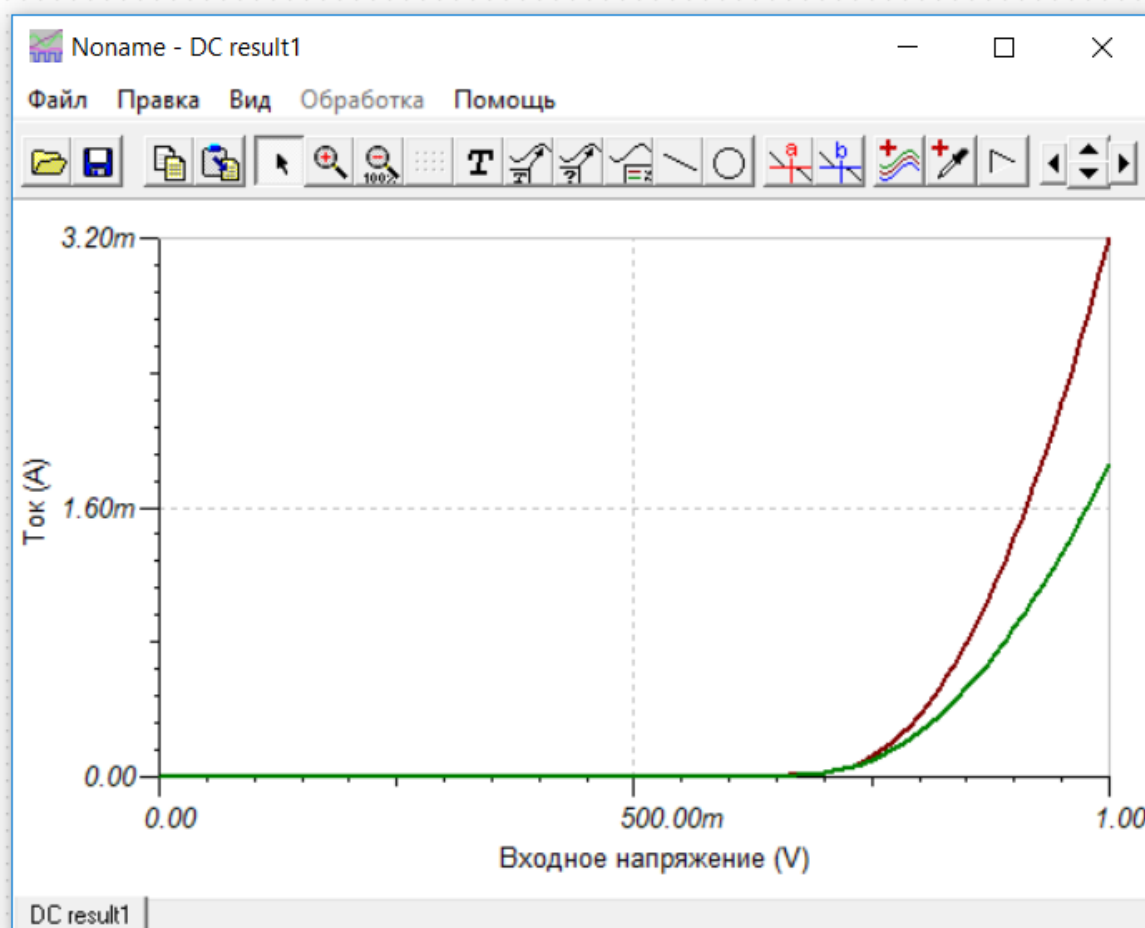


Рис. 31. Результат первой итерации расчёта выходных характеристик

Для определения пределов расчёта нам нужно определить максимальный ток базы, его мы возьмём из ранее построенных выходных характеристик. Для

определения  $I_{B \max}$  обратимся к сохранённым в черновике выходным характеристикам с легендой (рис. 31).

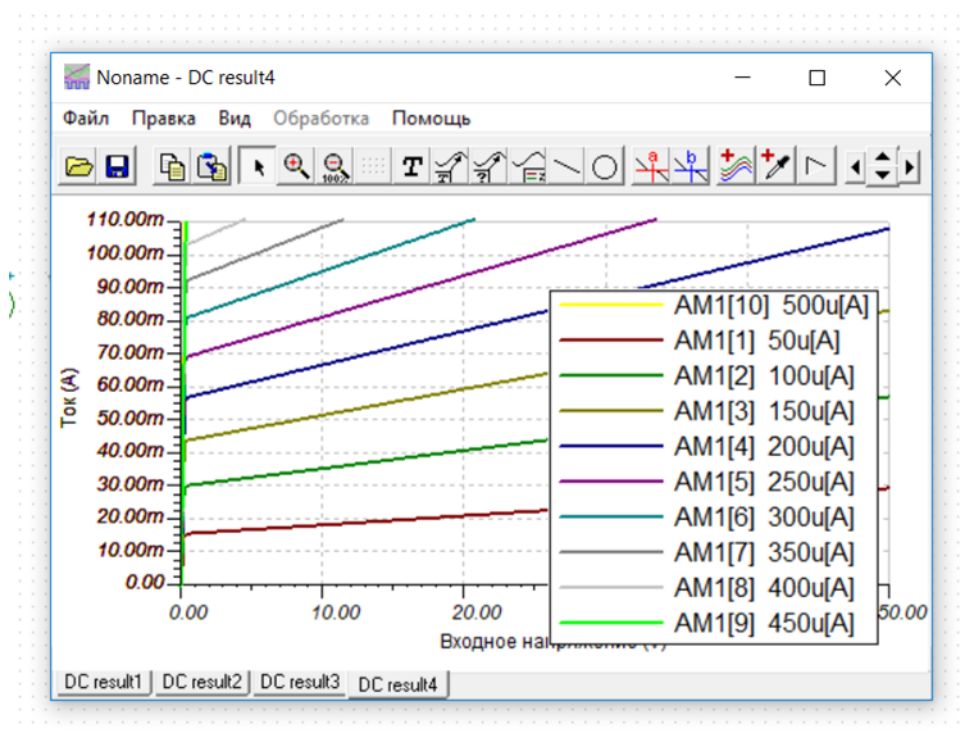


Рис. 32. Ранее полученные (рис. 18) и сохранённые в черновике выходные характеристики с легендой

В нашем случае, вблизи максимального тока коллектора  $I_{K \max} = 100$  мА расположена светло-серая характеристика AM1[8] 400uA, таким образом, наша входная характеристика для бОльшего напряжения  $U_{кэ}$  должна заканчиваться рядом с этим значением.

На построенных входных характеристиках (рис. 31) мы видим, что верхняя граница тока базы в 8 раз превышает полученное максимальное значение (3,2 мА против 400 мкА=0,4 мА).

Для получения выходной характеристики в нужном диапазоне, нам необходимо определить напряжение база-эмиттер, соответствующее  $I_B = 400$  мкА.

Для этого воспользуемся курсорными измерениями (рис. 33).

Выберем, например, курсор «а» (рис.33, поз. 1) и расположим его на характеристике, соответствующей бОльшему напряжению коллектора (рис.33, поз. 2), затем введём значение максимального тока базы в поле ввода координаты «у» (рис.33, поз. 3), и в поле координаты «х» мы получим искомое значение напряжения база-эмиттер ( $U_{бэ} = 827$  мВ) (рис.33, поз. 4).

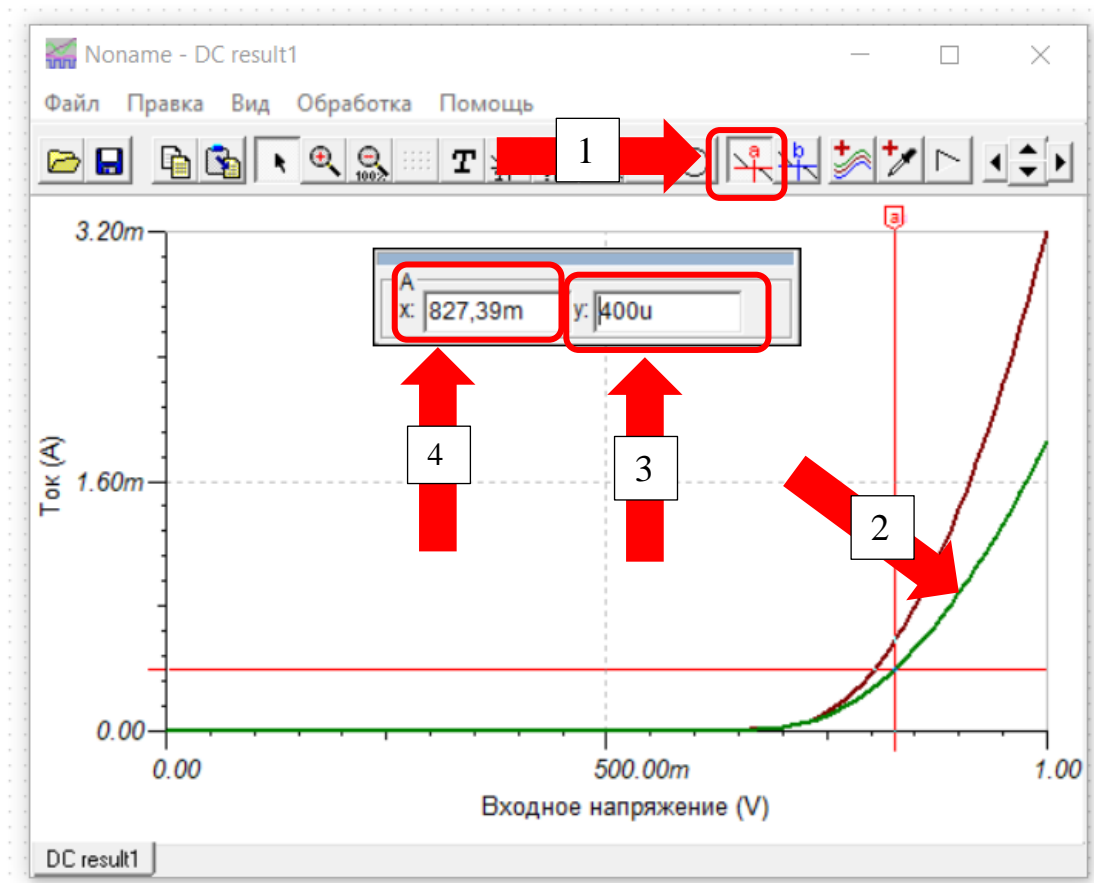
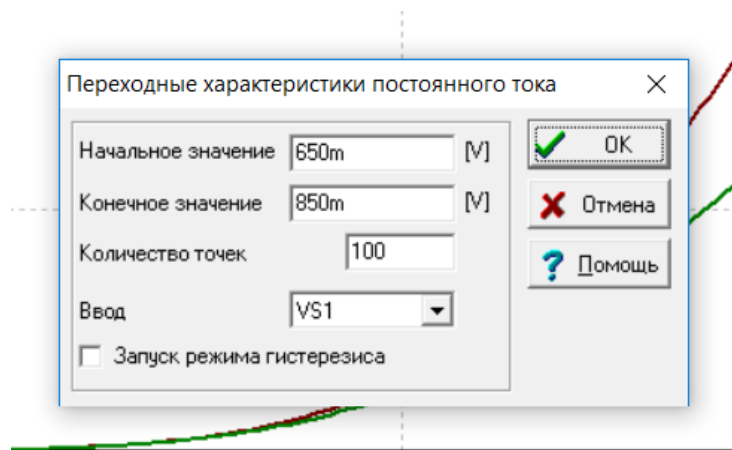


Рис. 33. Определение диапазона построения входных характеристик

При окончательном выборе диапазона расчёта входных характеристик, примем  $U_{БЭ} = 850 \text{ мВ} = 0,85 \text{ В}$  (для удобства построения осей значение лучше брать кратными 5, но это является определяющим критерием). При выборе нижнего предела, обратим внимание на то, что  $I_B$  для напряжений  $U_{БЭ} < 650 \dots 700 \text{ мВ}$  фактически равны нулю (это обусловлено тем, что эти значения ниже напряжения открытия р-п перехода), таким образом, мы можем принять в качестве нижнего значения  $U_{БЭ} = 750 \text{ мВ} = 0,75 \text{ В}$ .

Введём полученные значения (рис. 34) и получим выходные характеристики (рис. 35).



**Сохрани**  
**В**  
**черновик!**

Рис. 34. Настройка диапазона изменения  $U_{БЭ}$

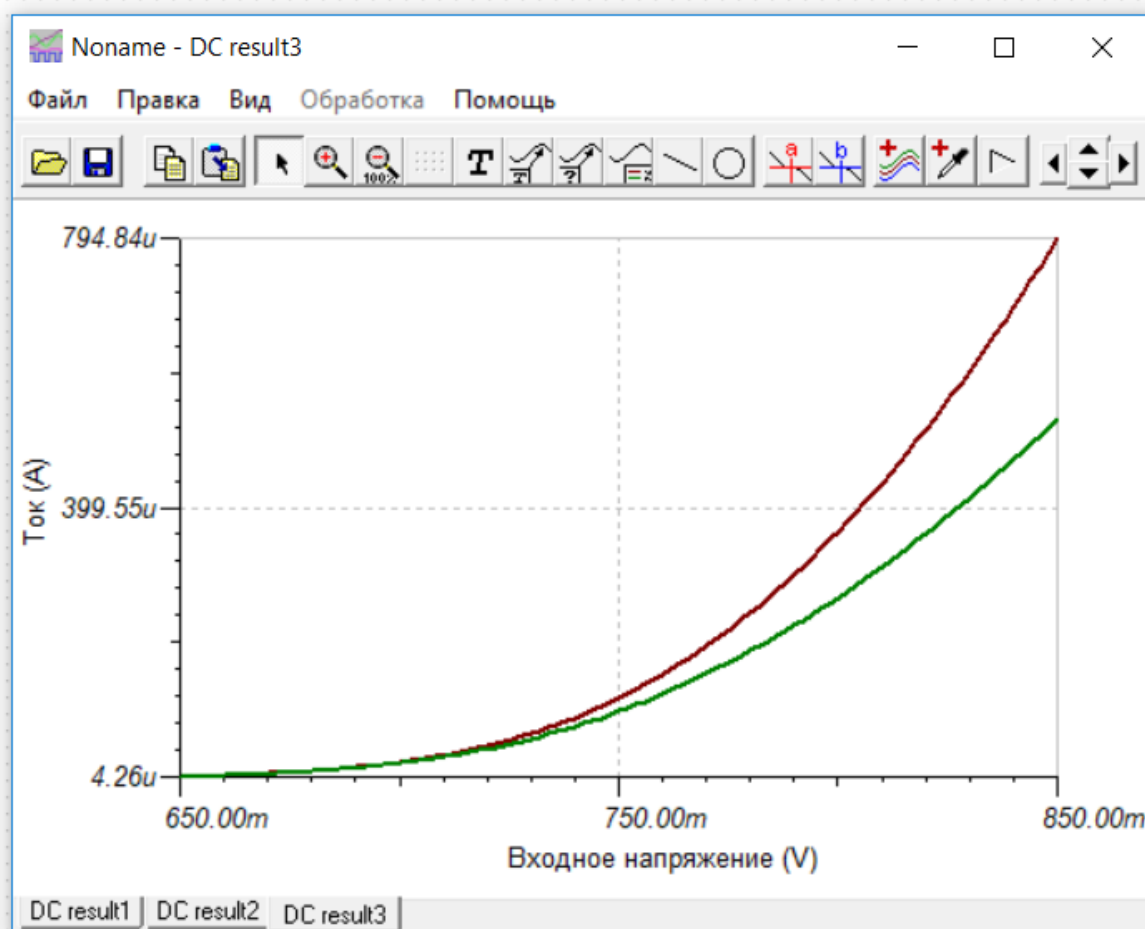


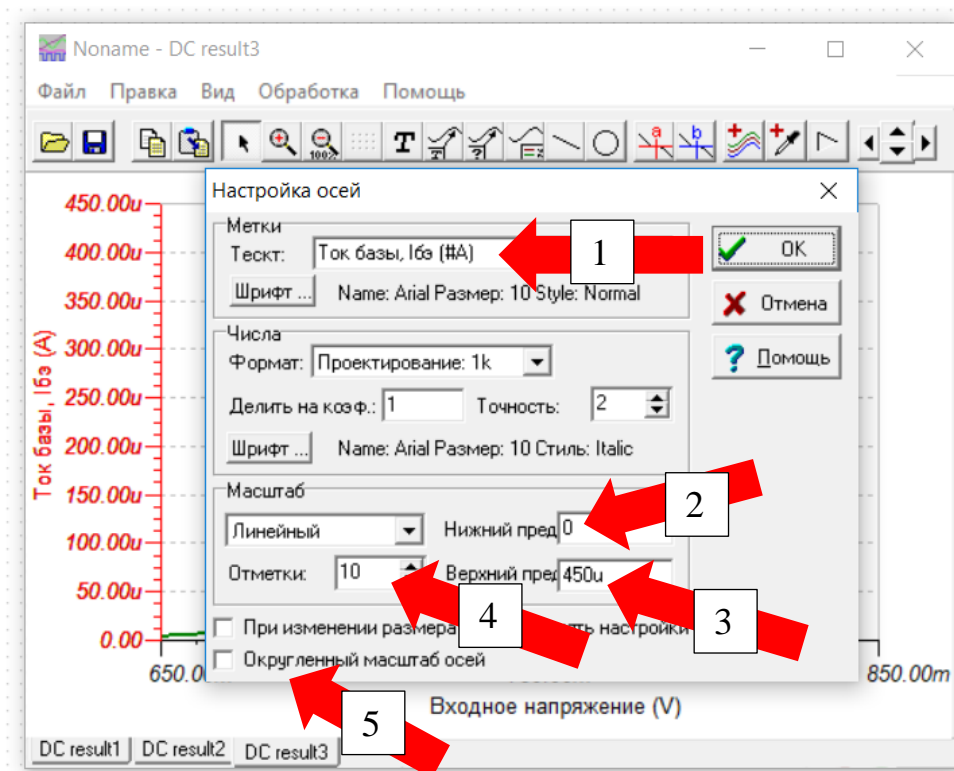
Рис. 35. Выходные характеристики после корректировки диапазона изменения  $U_{БЭ}$

Полученные характеристики (рис. 35) уже больше подходят для дальнейшей работы, но тем не менее нуждаются в корректировке внешнего вида.

Двойным щелчком вызовем меню настройки вертикальной оси и внесём следующие правки:

1. Изменим название оси на «Ток базы,  $I_{бэ}$  (#A)» (рис. 36, поз. 1).
2. Установим нижний предел равным нулю (рис. 36, поз. 2).
3. Установим верхний предел равным 450 мкА (450u) (рис. 36, поз. 3).
4. Количество отметок на шкале установим равным 10 (рис. 36, поз. 4).
5. Снимите отметку «Округлённый масштаб осей» (рис. 36, поз. 5).

При желании можно изменить шрифт написания названия шкалы и числовых меток на ней (меняются по отдельности). Так же может быть удобно изменить количество отображаемых знаков после запятой (поле «Точность»), но нужно быть аккуратным, т.к. это приведёт к округлению значений на оси и привести к ошибкам при расчётах.



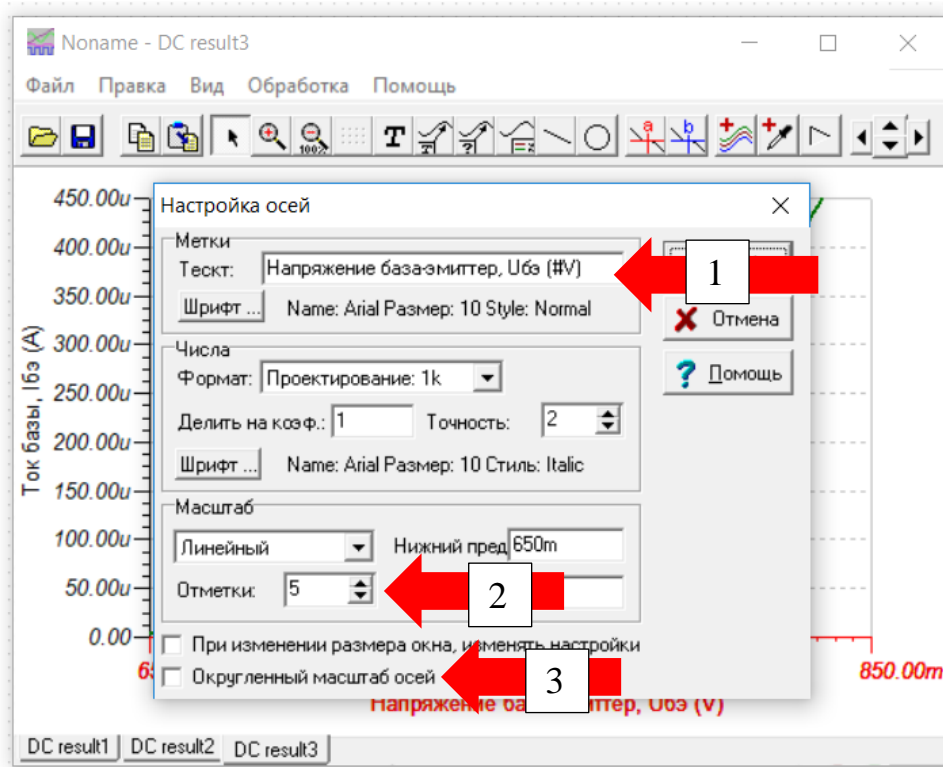
**Сохрани**  
**В**  
**черновик!**

Рис. 36. Настройка вертикальной оси

Завершим подготовку выходных характеристик настройкой горизонтальной оси:

1. Изменим название оси на «Напряжение база-эмиттер,  $U_{бэ}$  (#V)» (рис. 37, поз. 1).
2. Количество отметок на шкале установим равным 5 (рис. 37, поз. 2).
3. Снимите отметку «Округлённый масштаб осей» (рис. 37, поз. 3).


При желании можно изменить шрифт написания названия шкалы и числовых меток на ней (меняются по отдельности). Так же может быть удобно изменить количество отображаемых знаков после запятой (поле «Точность»), но нужно быть аккуратным, т.к. это приведёт к округлению значений на оси и привести к ошибкам при расчётах.



**Сохрани  
в  
черновик!**

*Рис. 37. Настройка горизонтальной оси*

Для расчёта усилительного каскада с общим эмиттером графо-аналитическим методом удобнее входные характеристики более вытянутые по вертикали, а по горизонтали более узкие, поэтому желательно изменить размеры окна с характеристиками с помощью мыши.

Затем скопируем полученные характеристики в буфер обмена с помощью кнопки  «Копировать» (рис. 38)

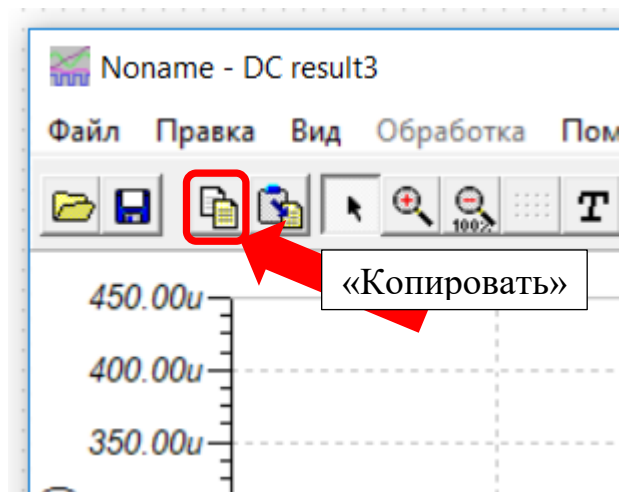


Рис. 38. Кнопка «Копировать»

Полученный результат вставим в отчёт (рис 39). Вставленный рисунок может иметь пустые пространства справа и снизу, их нужно удалить с помощью функции «Обрезка» текстового редактора

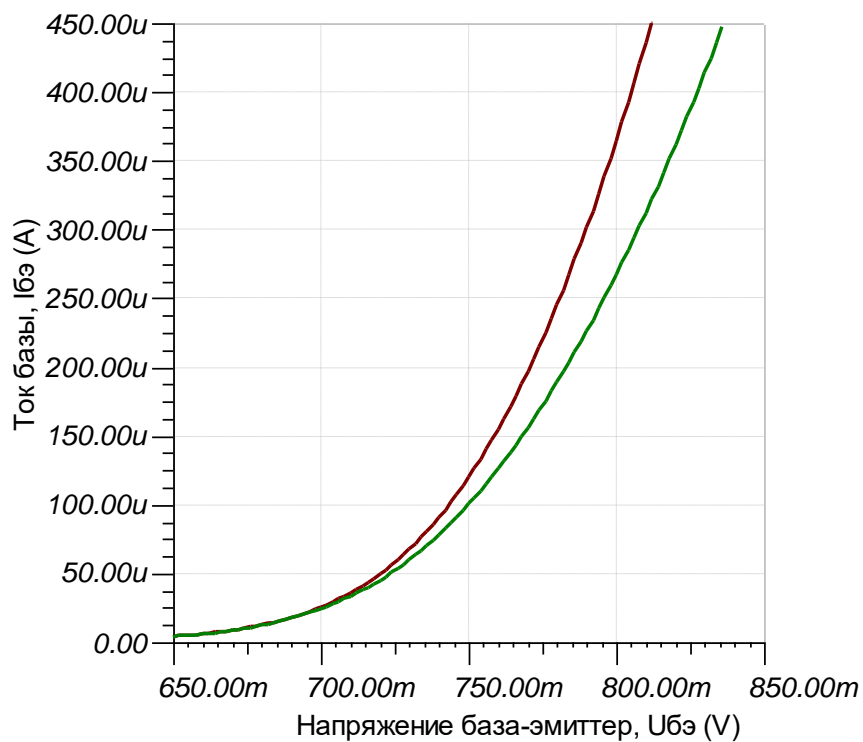






Рис. 39. Итоговый вид входных характеристик

### 1.5.3. Расчёт h-параметров по входным характеристикам

Расчёт h-параметров по входным характеристикам проводится аналогично расчёту  $h_{21}$  и  $h_{22}$  по выходным (п. 3.2.)

Для включения курсорных измерений необходимо нажать кнопки  и  (рис. 40, поз. 1). После нажатия кнопки курсор изменит свою форму и нужно будет выбрать характеристику для которой будут проводиться измерения. Положение курсоров можно изменять перемещая метки курсоров  и  в верхней части графика. В результате мы получим две пары перпендикулярных линий (рис. 40, поз. 2 и 3), кроме того, появится окно с координатами и разницей между ними (рис. 40. поз. 4).

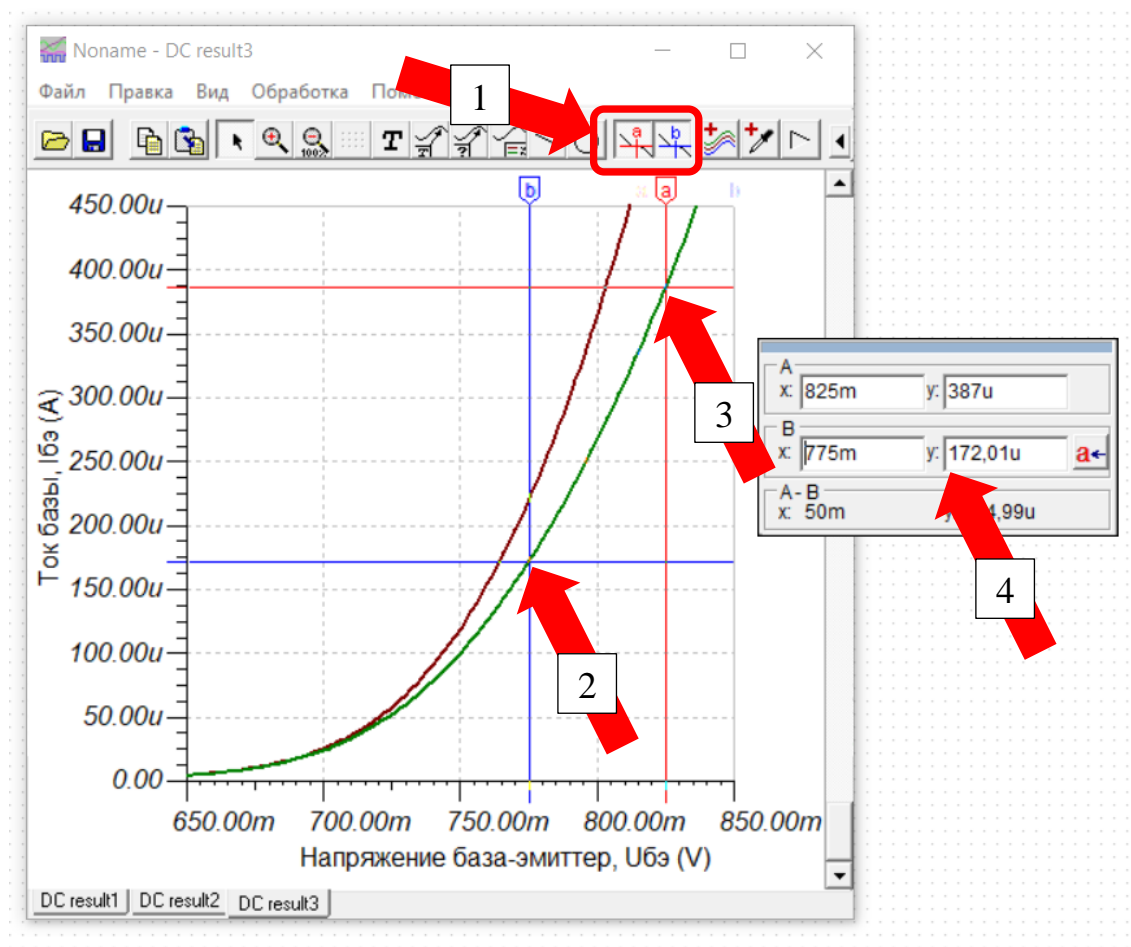


Рис. 40. Курсорные измерения на входных характеристиках

Окно с координатами (рис. 41) очень удобно для расчёта h-параметров. В этом окне мы видим поля с координатами «x» и «y» точек курсоров (рис. 40, поз. 1 и 2). В эти поля можно вводить желаемые координаты курсоров.

**Важно: ввод координат надо подтвердить клавишей «Enter»**

Под областью ввода координат показана разница между ними –  $(x_A - x_B)$  (рис. 41, поз. 3) и  $(y_A - y_B)$  (рис. 41, поз. 4)

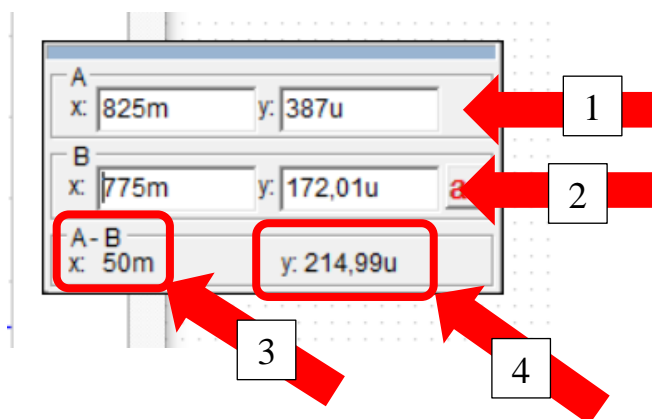


Рис. 41. Курсорные измерения

#### 1.5.4. Расчёт $h_{11}$

Параметра  $h_{11}$  рассчитывается по следующему выражению:

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_6} \right|_{U_{КЭ}=const}$$

Вспользуемся ранее рассмотренным примером для курсорных измерений (рис. 42). В данном примере току соответствует координата «у», а напряжению – «х». В окне параметров мы видим соответствующие значения токов и напряжений, а также их разницы:

|          | Точка «а» | Точка «b» | $\Delta$  |
|----------|-----------|-----------|---|
| $U_{БЭ}$ | 825 мВ    | 775 мВ    | $\Delta U_{БЭ} = U_{БЭa} - U_{БЭb} = 825\text{мВ} - 775\text{мВ} = 50\text{мВ}$ |
| $I_9$    | 387 мкА   | 172 мкА   | $\Delta I_Б = I_{Ба} - I_{Бb} = 387\text{мкА} - 172\text{мкА} = 215\text{мкА}$  |

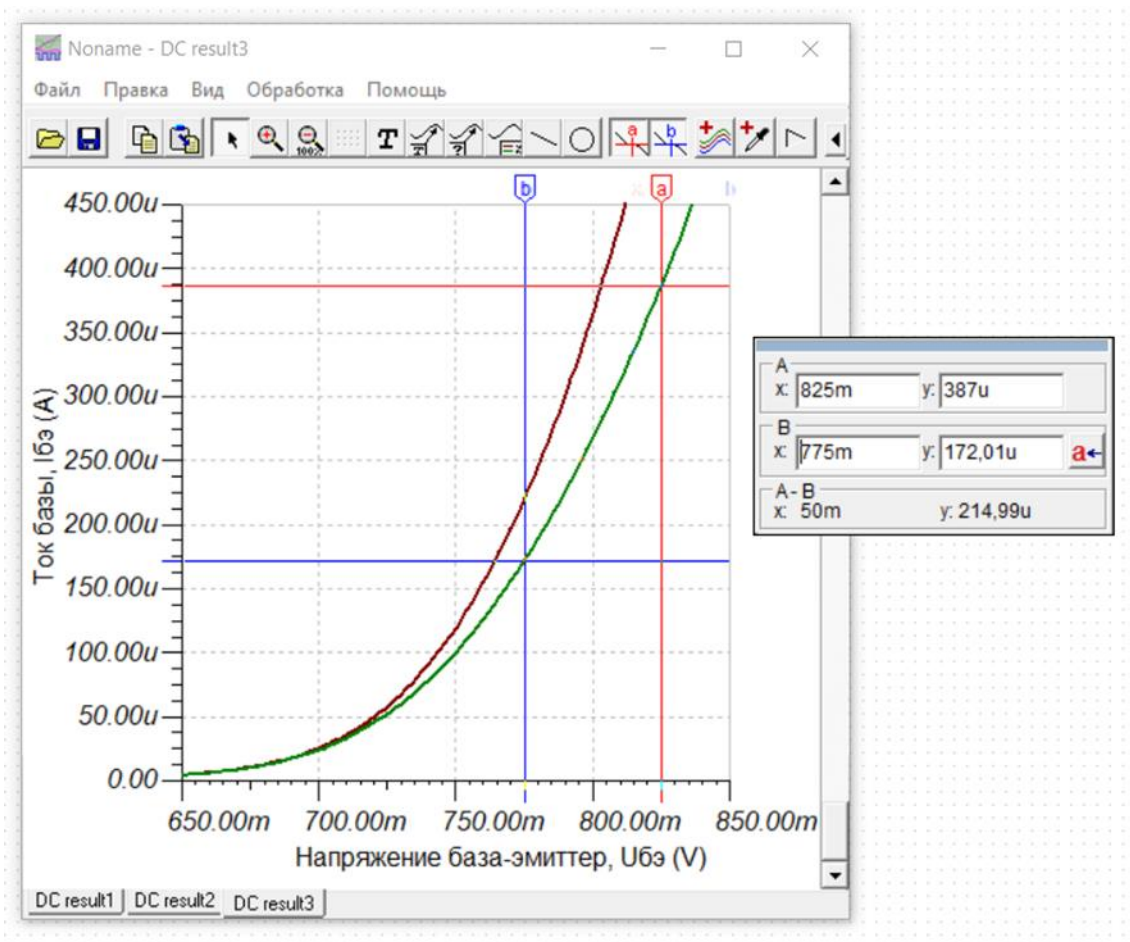


Рис. 42. Расчёт  $h_{11}$

В итоге получим:

$$h_{11} = \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_Б} = \frac{825\text{мВ} - 775\text{мВ}}{387\text{мкА} - 172\text{мкА}} = \frac{50\text{мВ}}{215\text{мкА}} = \frac{50\text{мВ}}{0,215\text{мА}} = 232 \text{ Ом}$$

### 1.5.5. Расчёт $h_{12}$

Параметра  $h_{21}$  рассчитывается по следующему выражению

$$h_{12} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_{БЭ} = \text{const}}$$

Для расчёта  $h_{12}$  нам нужно измерить  $U_{БЭ}$  на двух соседних характеристиках. Для этого нужно дважды нажать кнопку выбора курсора «b» и установить курсор на соседнюю характеристику (рис. 43. Видно, что вертикальные линии курсоров слились, т.к. у них одинаковое значение по оси «x»).

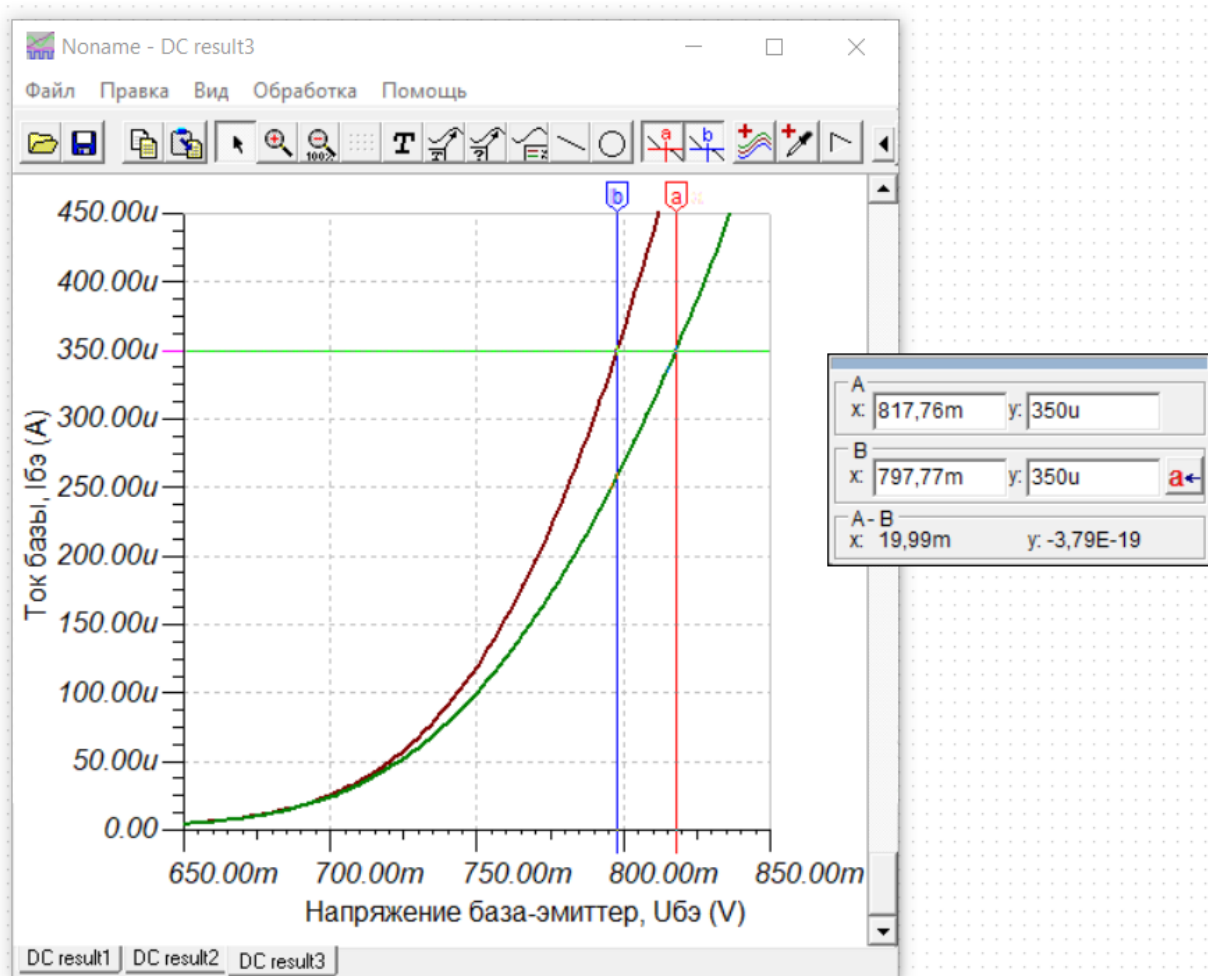


Рис. 43. Расчёт  $h_{21}$

Вертикальные линии курсоров слились, т.к. у них одинаковое значение по оси «x» ( $I_B = \text{const} = 350 \text{ мкА}$ )

Величина  $\Delta U_{КЭ}$  равна шагу, выбранному для VS5 (см. рис. 28).

Для нашего случая выбраны:

Начальное значение – 1.

Конечное значение – 41.

Следовательно  $\Delta U_{КЭ} = 41 - 1 = 40 \text{ В}$

В итоге получим:

$$h_{12} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_{БЭ}=\text{const}} = \frac{817 \text{ мВ} - 797 \text{ мВ}}{40 \text{ В}} \bigg|_{I_B=350 \text{ мкА}} = \frac{20 \text{ мВ}}{40 \text{ В}} = 0,5 \cdot 10^{-3}$$

## 2. ПОСТРОЕНИЕ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРА В СРЕДЕ EWB

В соответствии с указаниями преподавателя выберите вариант задания, и выпишите указанный в нём тип транзистора.

Для изучения порядка построения характеристик используем транзистор ZTX869 (отсутствует в вариантах задания).

### 2.1. Определение предельных параметров транзистора

После получения варианта необходимо в интернете найти документ с характеристиками транзистора (datasheet). Пример для транзистора ZTX869B приведён на рис. 1.

При поиске необходимо учесть, что datasheet содержать характеристики нескольких транзисторов с близкими характеристиками (различающиеся, например, максимальной мощностью, так же могут быть приведены комплиментарные пары транзисторов NPN – PNP). В этом случае выбираются параметры только для транзистора из полученного варианта. Так же могут быть приведены транзисторы близких модификаций (в рассматриваемом примере нашёлся datasheet на модификацию «B» транзистора).

В сложных случаях необходимо проконсультироваться у преподавателя.

# NPN SILICON PLANAR MEDIUM POWER HIGH GAIN TRANSISTOR

**ZTX689B**

**ISSUE 1 – MAY 94**

## FEATURES

- \* 20 Volt  $V_{CE0}$
- \* Gain of 400 at  $I_C=2$ mA
- \* Very low saturation voltage

## APPLICATIONS

- \* Darlington replacement
- \* Flash gun converters
- \* Battery powered circuits
- \* Motor drivers

E-Line  
TO92 Compatible

## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS.

| PARAMETER   | SYMBOL         | VALUE       | UNIT               |
|---|----------------|-------------|--------------------|
| Collector-Base Voltage  | $V_{CB0}$      | 20          | V                  |
| Collector-Emitter Voltage   | $V_{CE0}$      | 20          | V                  |
| Emitter-Base Voltage  | $V_{EB0}$      | 5           | V                  |
| Peak Pulse Current  | $I_{CM}$       | 8           | A                  |
| Continuous Collector Current  | $I_C$          | 3           | A                  |
| Practical Power Dissipation*  | $P_{DPR}$      | 1.5         | W                  |
| Power Dissipation: at $T_{amb}=25^{\circ}\text{C}$<br>derate above $25^{\circ}\text{C}$ | $P_{tot}$      | 5.7         | W                  |
| Operating and Storage Temperature Range   | $T_j, T_{stg}$ | -55 to +200 | $^{\circ}\text{C}$ |

\* The power which can be dissipated assuming the device is mounted in a typical manner on a P.C.B. with copper equal to 1 inch square minimum

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS (at $T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$ )

| PARAMETER                             | SYMBOL       | MIN. | TYP. | MAX. | UNIT          | CONDITIONS.                           |
|---------------------------------------|--------------|------|------|------|---------------|---------------------------------------|
| Collector-Base Breakdown Voltage      | $V_{CB0}$    | 20   |      |      | V             | $I_C=100\mu\text{A}$                  |
| Collector-Emitter Breakdown Voltage   | $V_{CE0}$    | 20   |      |      | V             | $I_C=10\text{mA}^*$                   |
| Emitter-Base Breakdown Voltage        | $V_{EB0}$    | 5    |      |      | V             | $I_C=100\mu\text{A}$                  |
| Collector Cut-Off Current             | $I_{C0}$     |      |      | 0.1  | $\mu\text{A}$ | $V_{CB}=16\text{V}$                   |
| Emitter Cut-Off Current               | $I_{E0}$     |      |      | 0.1  | $\mu\text{A}$ | $V_{EB}=4\text{V}$                    |
| Collector-Emitter Saturation Voltage  | $V_{CEsat}$  |      |      | 0.1  | V             | $I_C=0.1\text{A}, I_B=0.5\text{mA}^*$ |
|                                       |              |      |      | 0.5  | V             | $I_C=2\text{A}, I_B=10\text{mA}^*$    |
| Base-Emitter Saturation Voltage       | $V_{BEsat}$  |      |      | 0.9  | V             | $I_C=1\text{A}, I_B=10\text{mA}^*$    |
| Base-Emitter Turn-On Voltage          | $V_{BE(on)}$ |      |      | 0.9  | V             | $I_C=1\text{A}, V_{CE}=2\text{V}^*$   |
| Static Forward Current Transfer Ratio | $h_{FE}$     | 500  |      |      |               | $I_C=0.1\text{A}, V_{CE}=2\text{V}^*$ |
|                                       |              | 400  |      |      |               | $I_C=2\text{A}, V_{CE}=2\text{V}^*$   |
|                                       |              | 150  |      |      |               | $I_C=6\text{A}, V_{CE}=2\text{V}^*$   |

3-235

Рис. 1. Datasheet транзистора ZTX869B

В найденной документации выбираются следующие параметры:

4. Максимальный ток коллектора ( $I_C$ )
5. Максимальное напряжение коллектор-эмиттер ( $V_{CE\_}$ )
6. Максимальная рассеиваемая на коллекторе мощность ( $P_{tot}$ )

Обычно эти параметры указываются в начале datasheet в разделе «ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS»

В datasheet транзистора ZTX869B эти величины приведены на первой странице в таблице ABSOLUT MAXIMUM RATINGS и равны:

$$I_{K\max} = I_C = 3 \text{ A (Continuous Collector Current)}$$

$$U_{KЭ\max} = U_{CEO} = 20 \text{ B (Collector-Emitter Voltage)}$$

$$P_{K\max} = P_{tot} = 25 \text{ Вт (Practical Power Dissipation)}$$

## **2.2. Построение характеристик**

### **2.3. Запуск программы**

Для построения семейства выходных характеристик воспользуемся программой Electronic Workbench.

В прилагаемых материалах она представлена в виде архива, который нужно развернуть на компьютере.

Программа не требует установки и запускается файлом Wewb32 (рис. 2).

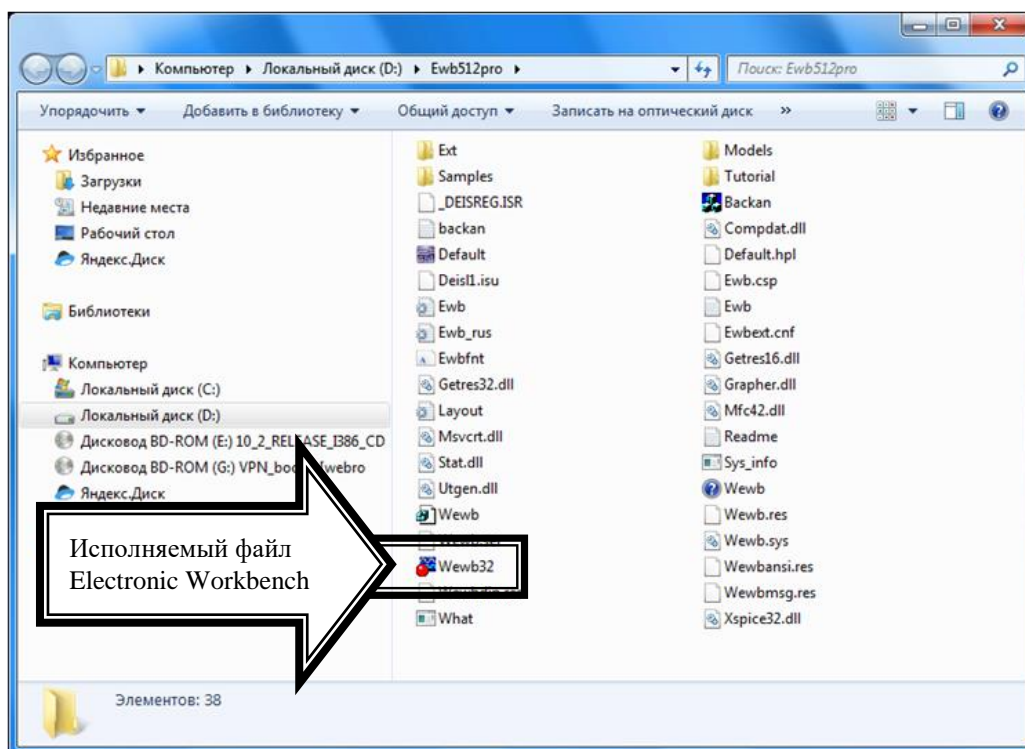


Рис. 2. Файл запуска Electronic Workbench

Программа может не запускаться на Windows 10. В случае проблем необходимо закрыть другие программы, в первую очередь браузер Chrome или основанные на его движке (Яндекс), и установить режим совместимости «Windows XP (Пакет обновления 2)» (Рис. 3).

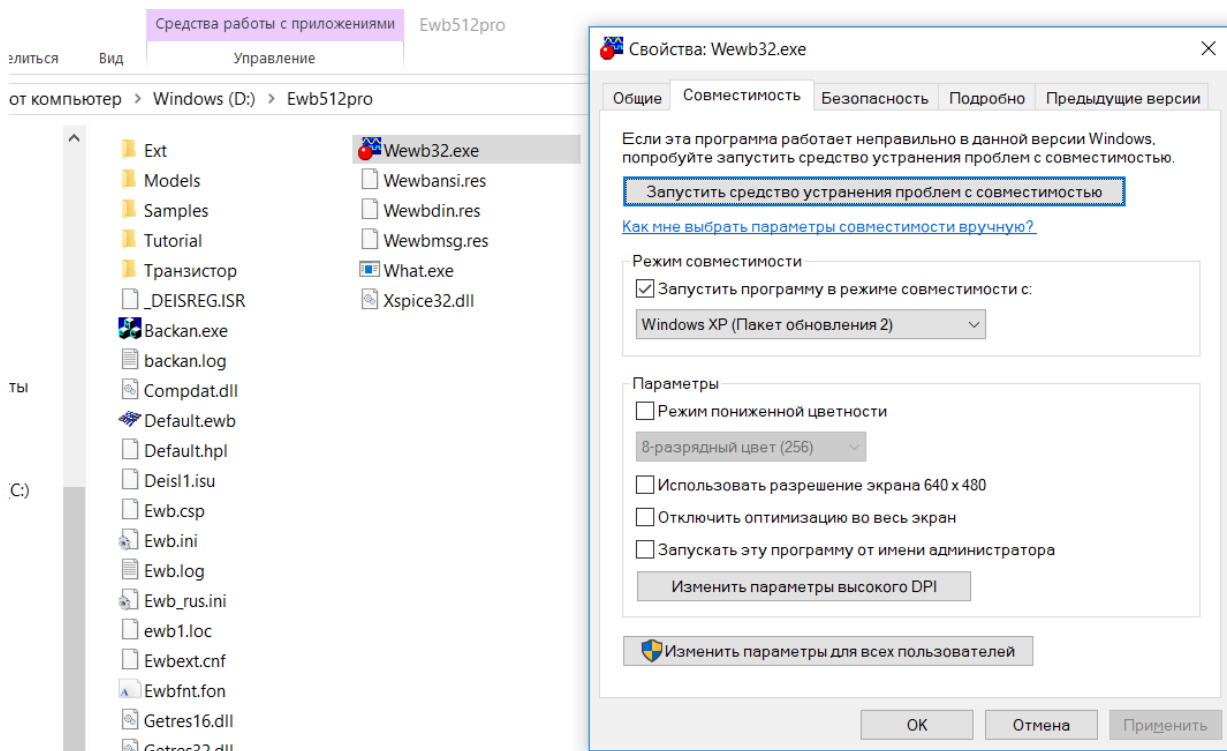


Рис. 3 Установка режима совместимости

## 2.4. Построение семейства выходных характеристик

### 2.4.1. Подготовка схемы для исследования

Для построение выходных характеристик откройте файл **1-Out\_tran.ewb** (рис. 4).

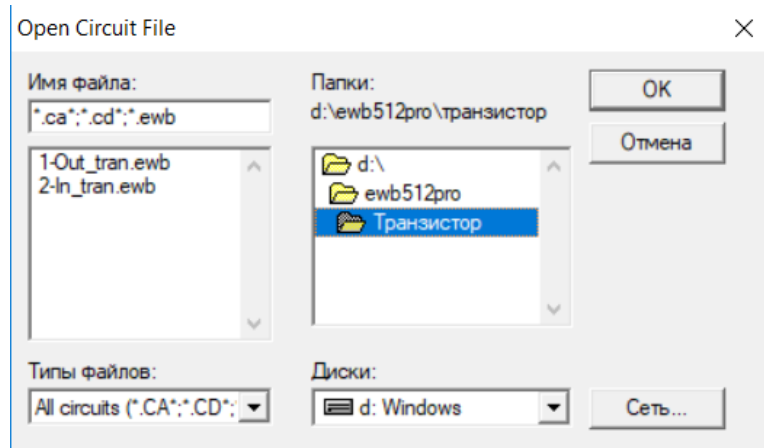


Рис. 4. Файл для построения семейства выходных характеристик

Открытый файл будет иметь вид как на рис. 5.

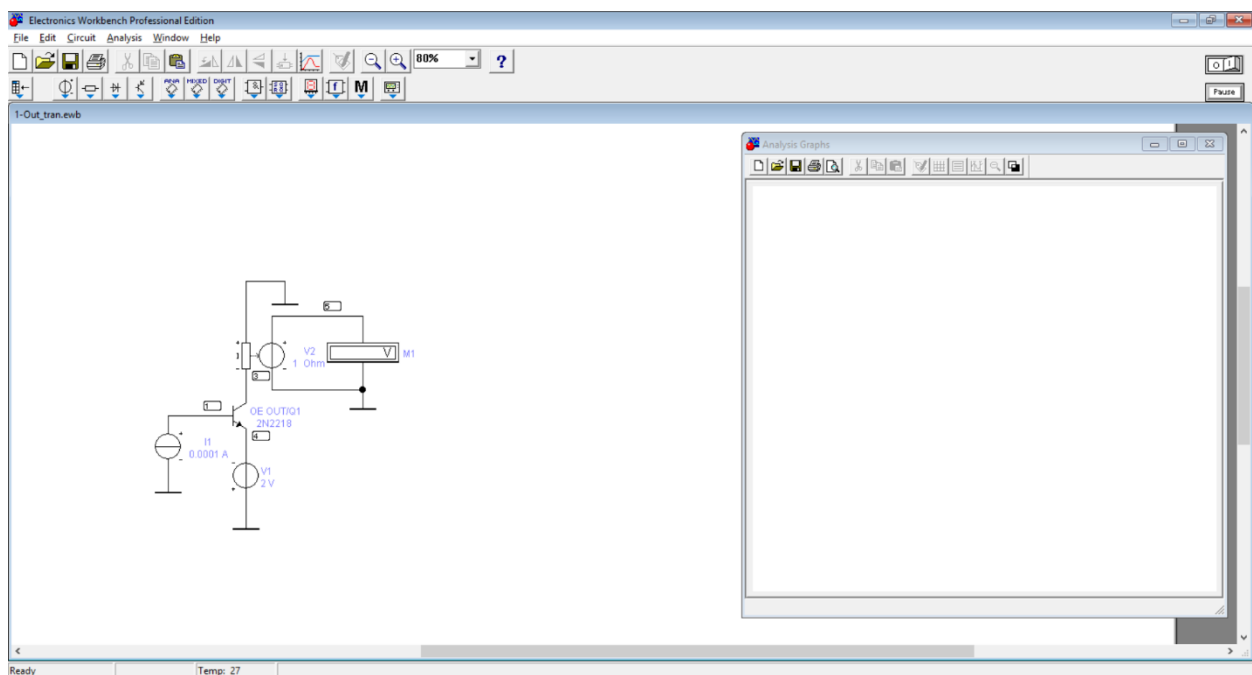


Рис. 5. Файл для построения семейства выходных характеристик

После открытия файла нужно имеющейся в схеме транзистор на полученный в задании. Для этого необходимо сделать двойной щелчок на транзисторе и выбрать полученный в задании тип транзистора (рис. 6)

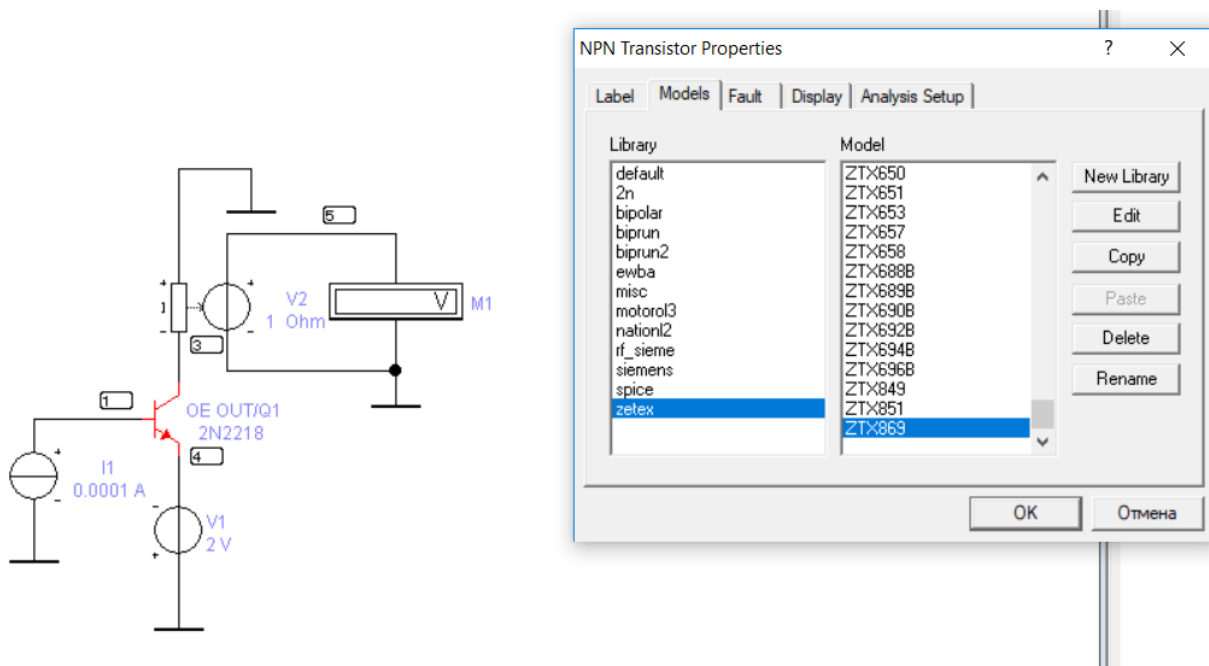


Рис. 6. Выбор типа транзистора

#### 2.4.2. Построение характеристик

Для построения характеристик необходимо выбрать пункт **DC Sweep** в меню **Analyses** (Рис. 7)

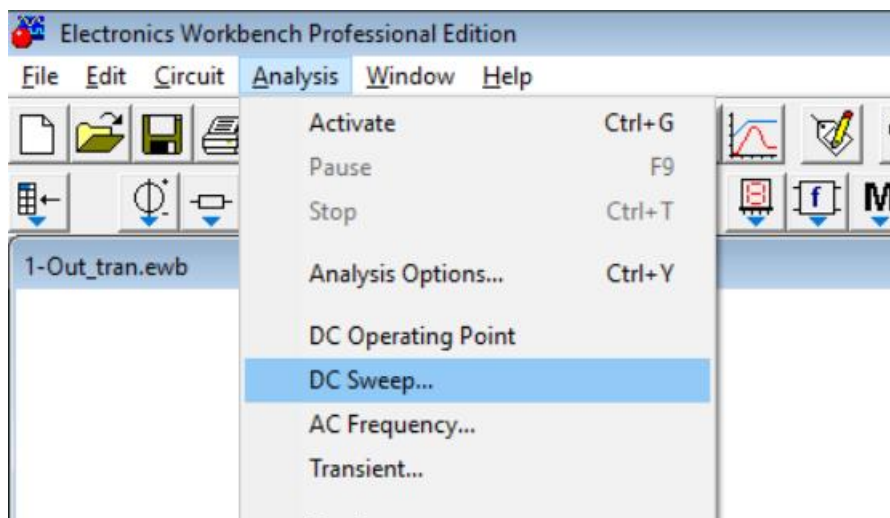


Рис. 7. Выбор пункта DC Sweep в меню Analyses

В результате мы увидим меню настройки режима анализа по постоянному току **DC Sweep** (Рис. 8).

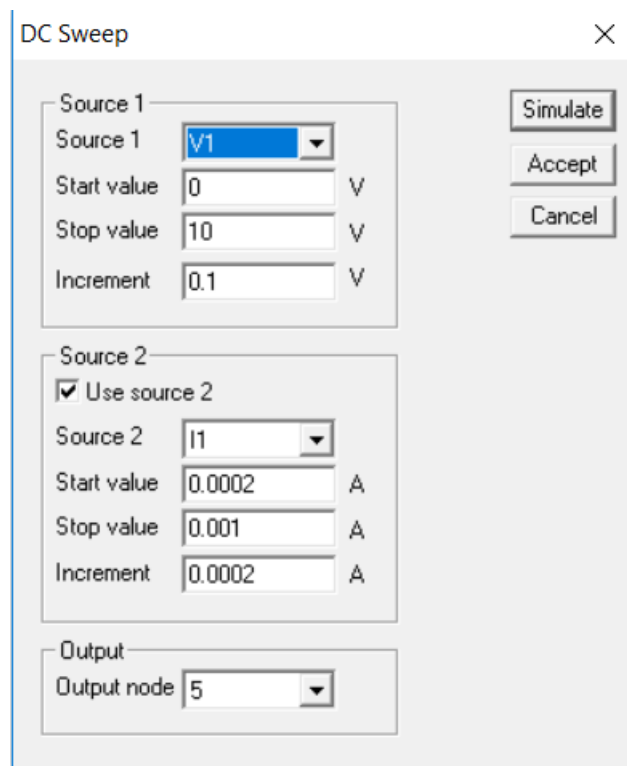


Рис. 8. Настройка режима DC Sweep

Раздел **Source 1** позволяет настроить диапазон напряжений коллектор – эмиттер ( $U_{КЭ}$ ), для которого будем строить выходные характеристики. Выбор значений описан в Таблице 1.

Таблица 1

| Наименование       | Перевод   | Значение                           | Примечание  |
|--------------------|---|------------------------------------|---|
| <b>Start value</b> | Начальное значение                                | 0                                  | Характеристики строим от нуля   |
| <b>Stop value</b>  | Конечное значение                                 | $\geq U_{КЭ \max} = U_{СЕО}$<br>21 | Для транзистора ZTX869В эта величина равна 20 В. Желательно выбрать несколько большее значение.                                       |
| <b>Increment</b>   | Шаг с которым проводится построение характеристик | 0.1 В                              | Влияет на гладкость построенных характеристик и время их построения. Выбирается самостоятельно, приведенное значение ориентировочное. |

Раздел **Source 2** позволяет настроить диапазон токов базы, для которых строятся характеристики. Выбор значений описан в Таблице 2.

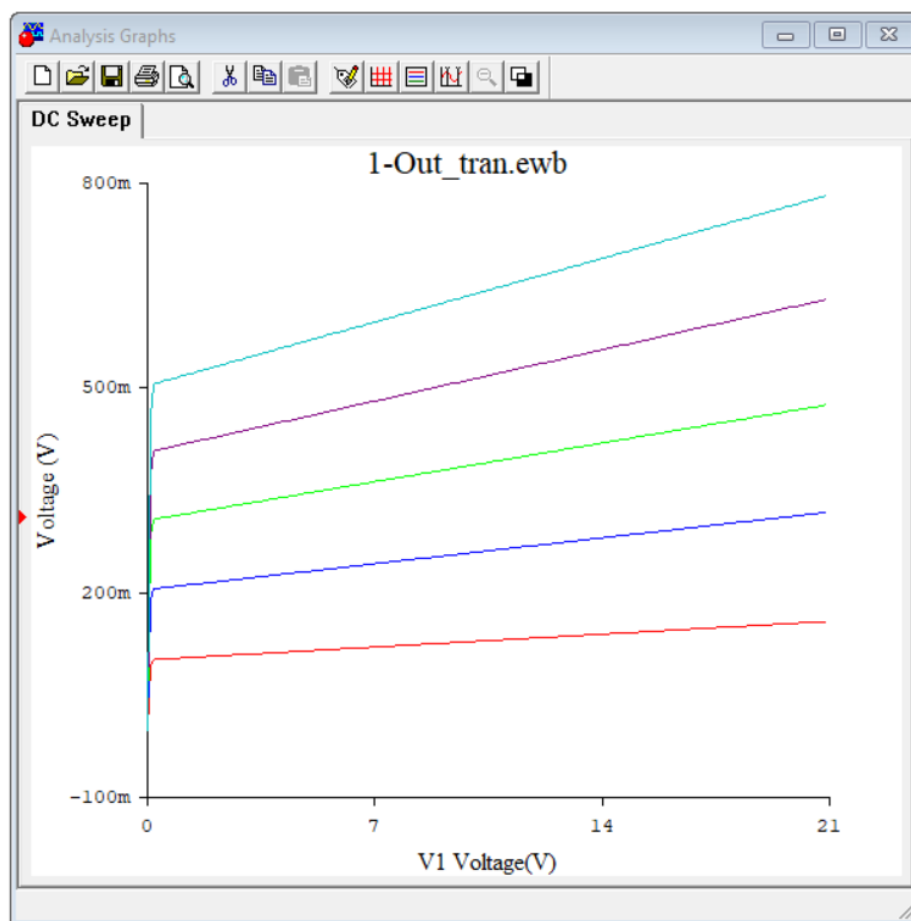
Выбор значения **Stop value** проводится экспериментально, путем подбора оптимального значения (верхняя характеристика на графике должна быть рядом со значением  $I_{K \max}$ , подробнее см. ниже).

**На первом шаге выбор значений не имеет роли. По результатам расчёта необходима коррекция**

Таблица 2

| Наименование       | Перевод   | Значение                     | Примечание   |
|--------------------|---|------------------------------|--|
| <b>Start value</b> | Начальное значение                                | Increment                    | В качестве ориентира лучше выбрать значение шага изменения тока базы   |
| <b>Stop value</b>  | Конечное значение                                 | Подбирается экспериментально | Подбирается так, чтобы верхняя характеристика была рядом с $I_{K \max}$  |
| <b>Increment</b>   | Шаг с которым проводится построение характеристик | Подбирается экспериментально | Влияет на количество выходных характеристик и шаг между ним.<br>Выбирается самостоятельно, приведенное значение ориентировочное. |

После выбора значений нажимаем кнопку Simulate и анализируем полученный результат (Рис. 9)



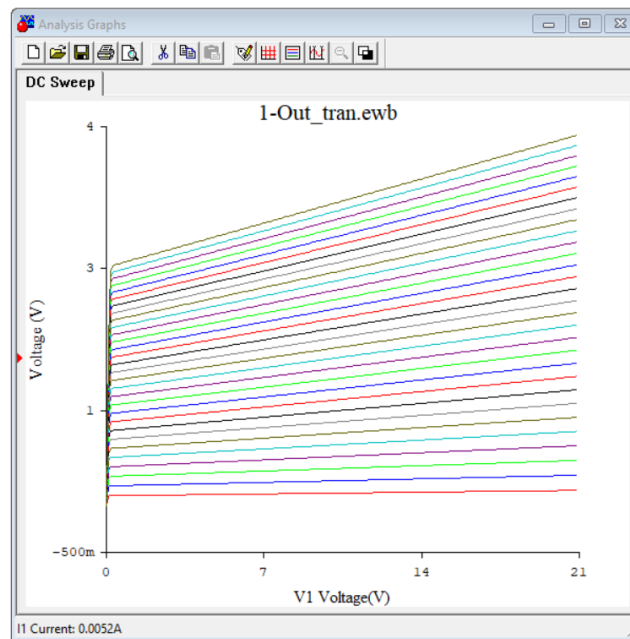
*Рис.9. Результат первой итерации анализа*

На полученном графике видим, что вертикальная ось отградуирована в вольтах, хотя мы ожидали увидеть ток коллектора. Это обусловлено применяемой схемой и эти значения численно равны току, поэтому в дальнейшем считаем что эта шкала в амперах.

Вторым важным моментом мы видим, что максимальный ток коллектора, для которого приведены характеристики равен  $\sim 500$  мА, в то время как в datasheet указано значение 3 А, для исправления этой ситуации необходимо изменить значение **Stop value** для **Source 2**. С учётом того, что 500 мА в 6 раз меньше 3 А, увеличим **Stop value** в шесть раз и установим значение 0.006 А.

Для вашего варианта подход к определению **Stop value** может несколько отличаться.

Результат приведён на Рис. 10



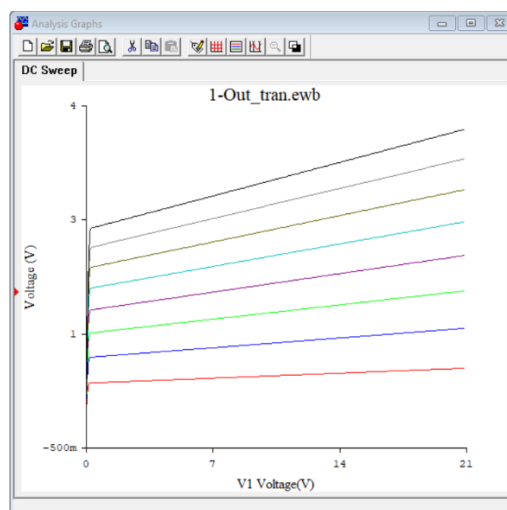
*Рис. 10. Результат второй итерации анализа*

Мы видим, что в результате второго расчёта мы получили искомую границу выходных характеристик на уровне  $I_{K \max} = 3 \text{ A}$ , однако полученные характеристики неудобно использовать по причине избыточного количества характеристик и пустых областей ниже  $I_{K \max} = 0 \text{ A}$  и выше  $I_{K \max} = 3 \text{ A}$ .

Для уменьшения количества характеристик изменим величину **Increment** (а также привязанную к ней **Start value**). Оптимальное количество выходных характеристик выбирается самостоятельно, с учётом дальнейших построений, в качестве ориентира можно использовать 5 – 10 характеристик.

Исходя из проведённого анализа, выберем **Increment = Start value = 0.0007**

Полученный результат и выбранные значения приведены на рис. 11.



*Рис. 11. Результат третьей итерации анализа*

Полученный результат не совсем соответствует ожиданиям – верхняя характеристика оказалась ниже максимального тока коллектора (3 А). Малая величина не должна вводить в заблуждение, т.к. после настройка вида графика, эта она будет иметь значительный размер. Получившаяся ошибка обусловлена комбинацией значений **Start value**, **Stop value** и **Increment**.

Для итоговой итерации установим **Stop value** равным 0.008. Результат приведён на рис. 12.

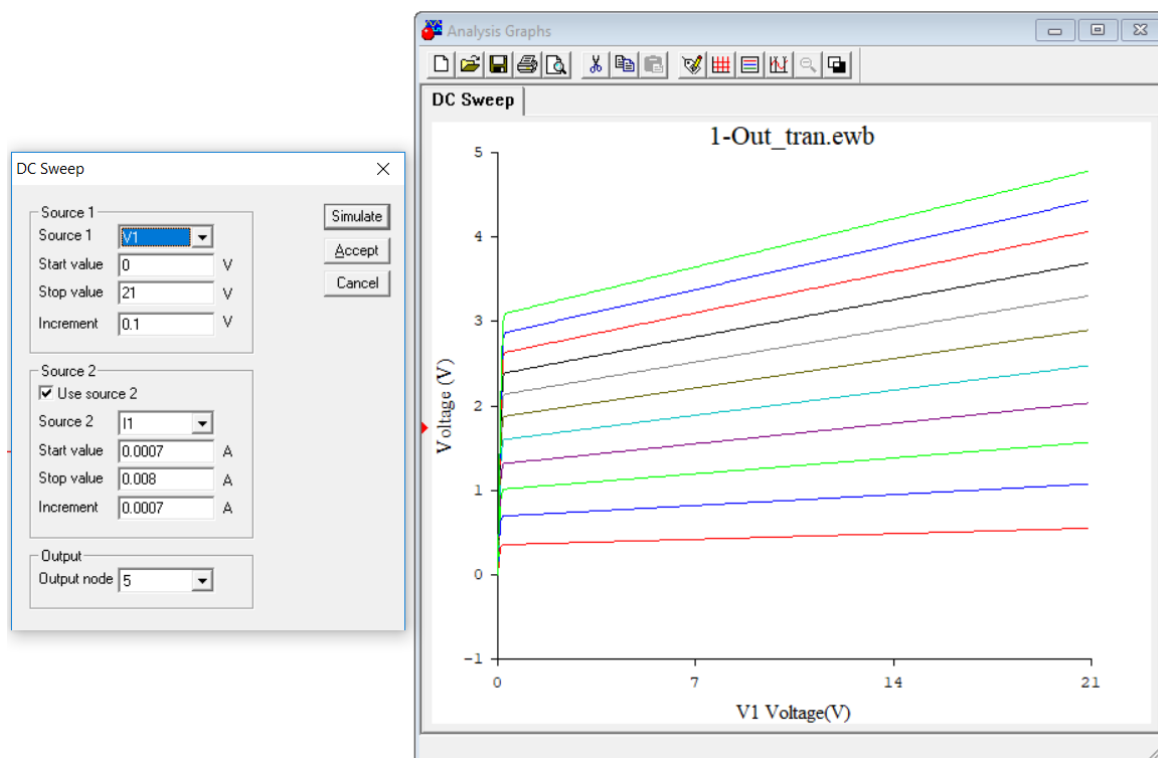


Рис. 12. Результат четвёртой (итоговой для рассматриваемого варианта) итерации анализа и выбранные значения параметров режима DC Sweep

Полученный результат соответствует заданным критериям (характеристики находятся в области меньших  $I_{K \max}$  и  $U_{KЭ \max}$ , число характеристик удобно для дальнейшего анализа), однако наличие пустых областей сверху и снизу делает работу с графиком в дальнейшем неудобной.

### 2.4.3. Настройка внешнего вида характеристик

Для настройки внешнего вида графика выберем пиктограмму **Properties** в верхней части окна с построенными характеристиками (рис. 13)

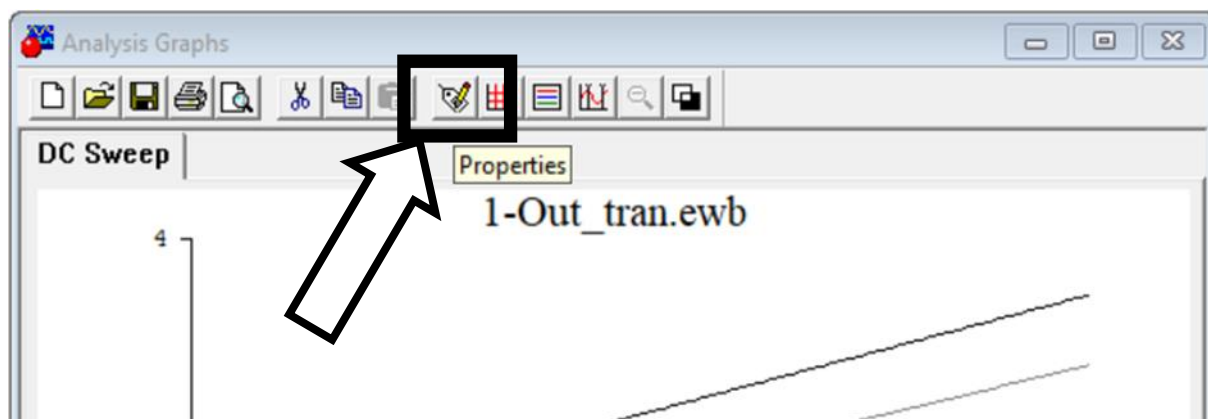


Рис. 13. Пиктограмма «**Properties**»

Первая закладка в открывшемся окне (рис. 14) называется **General**, проведём сразу настройку параметров в ней.

В разделе **Title** можно изменить название графика (запишем «Ic(Uce) ZTX869B»)

В разделе **Grid** можно включить сетку и настроить её параметры

Отметим пункт **Legend On**, т.к. в легенде будут указаны токи базы, для которых строились характеристики. Эти значения потребуются позже.

Проведённые настройки сохраним, нажав кнопку «**Применить**»

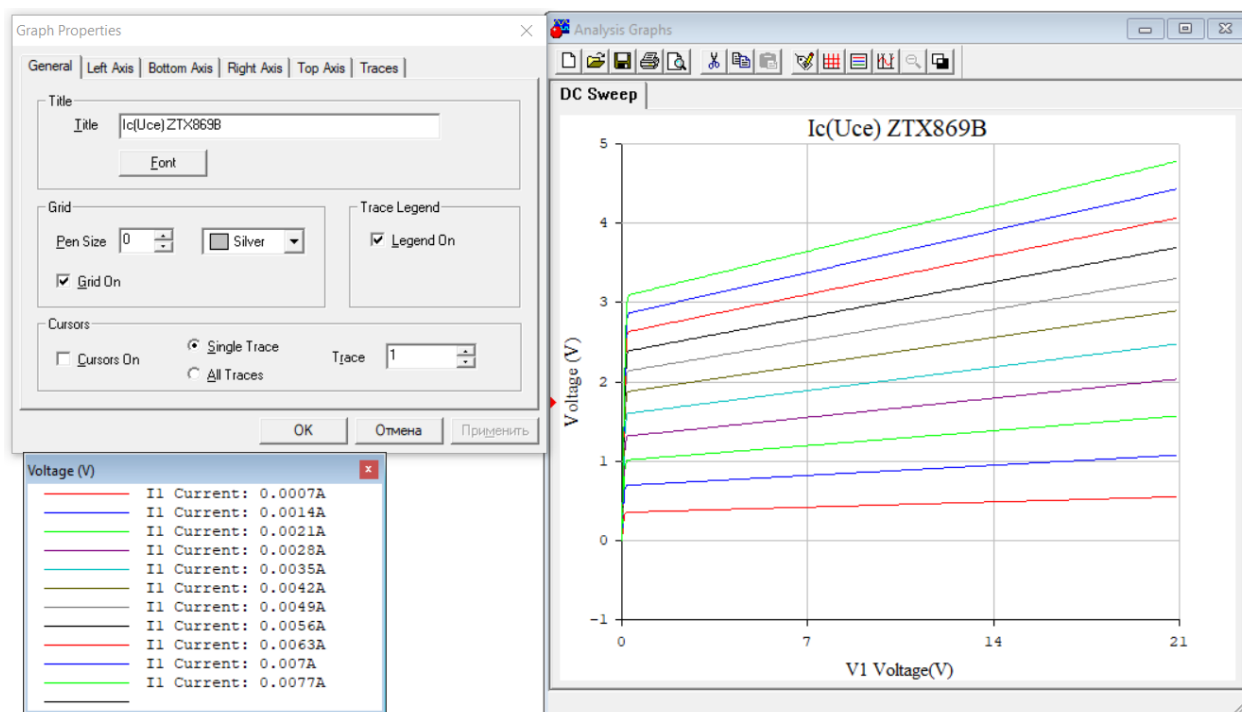


Рис. 14. Настройки **General**

Перейдем в закладку **Left Axis** (рис. 15).

Исправим название вертикальной оси, установив значение **Label** «Ic (A)».

Следующий интересующий нас пункт это **Range**. Установим значения **Minimum** равным 0, а **Maximum** – 3.5

Раздел **Division** позволяет управлять количеством показываемых значений на оси, шагом между ними и другими характеристиками.

Сделаем метки на оси каждые 0.5 А. Для нашего максимального значения 3.5 А это будет  $(3.5 * 2)$  будет 7 меток. Установим значение поля **Number** равным «7». В поле **Frequency** поставим значение «1»

Поле **Precision** управляет количеством знаков после запятой для значений по оси. Очень важно заменить на отличное от нуля (обычно достаточно 1 или 2), иначе могут быть отображены значения, вводящие в заблуждение. Установим поле **Precision** равным «1».

В поле **Scale** устанавливается множитель для всех значений по оси, установим «1».

Проведённые настройки сохраним, нажав кнопку «**Применить**»

Внешний вид закладки и проведённые настройки приведены на рис. 15.

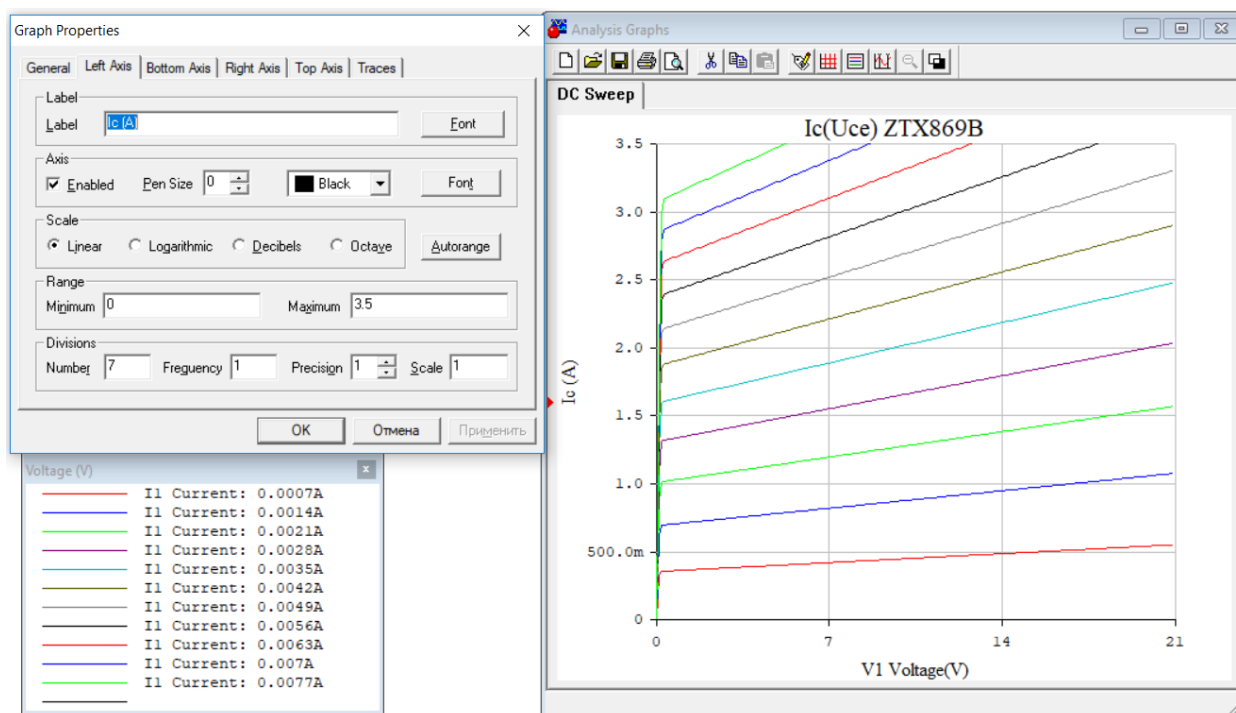


Рис. 15. Настройки **Left Axis**

Перейдем в закладку **Bottom Axis** (рис. 16).

Исправим название горизонтальной оси, установив значение **Label** «Uce (B)».

В разделе **Division** установим **Number** = 7, **Frequency** = 1, **Precision**= 0, **Scale** = 1.

Проведённые настройки сохраним, нажав кнопку «**Применить**»

Внешний вид закладки и проведённые настрой приведены на рис. 16.

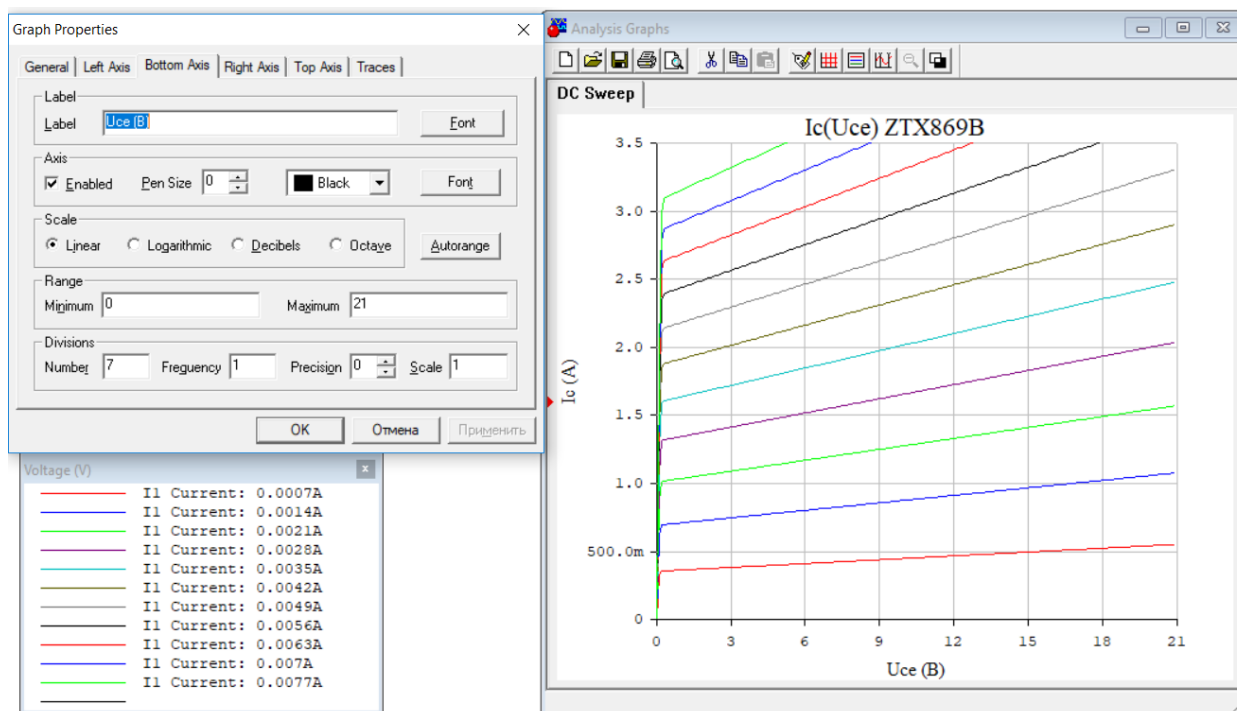


Рис. 16. Настройки **Bottom Axis**

Перейдем в закладку **Traces** (рис. 17).

На этой вкладке желательно настроить толщину линий графиков, т.к. при распечатке на принтере толщины по умолчанию будет недостаточно – графики будут трудноразличимы.

Для настройки нужно установить значение **Pen Size** равным «2». Для выбора линии графика нужно переключать стрелками значения **Trace**.

Проведённые настройки сохраним, нажав кнопку «**Применить**»

Внешний вид закладки и проведённые настрой приведены на рис. 17.

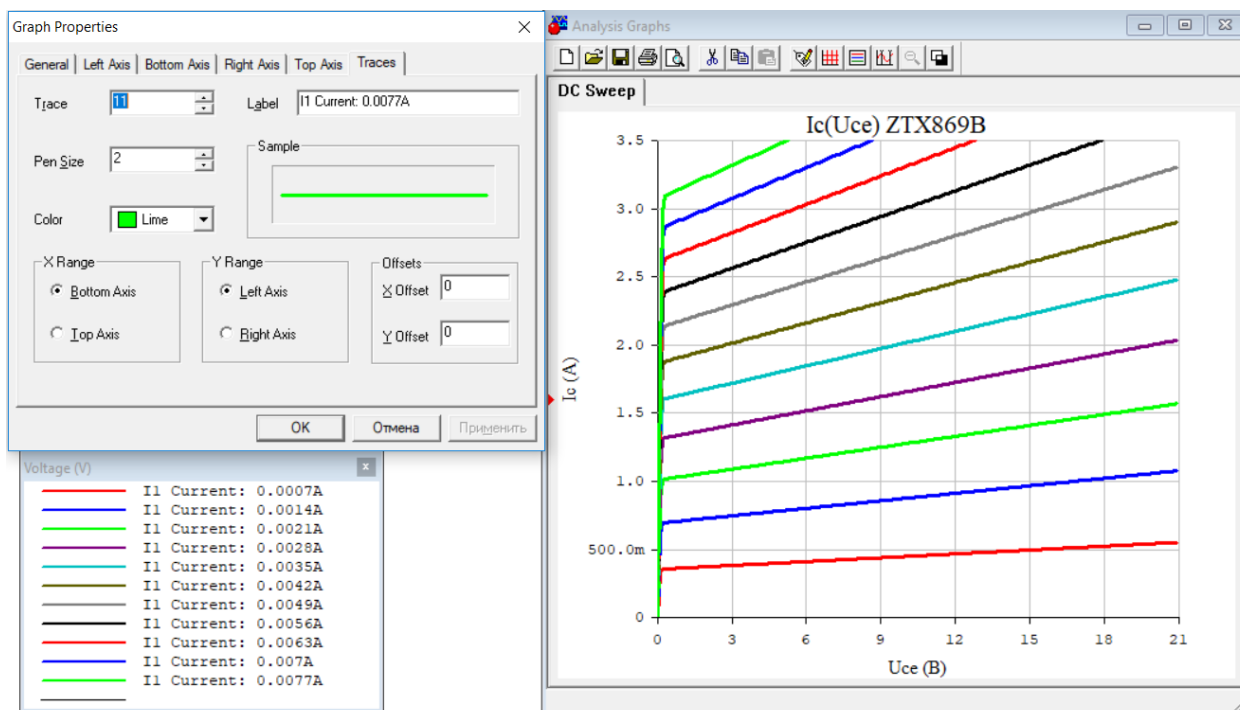


Рис. 17. Настройки *Traces*

На этом построение выходных характеристик закончено, теперь их нужно сохранить, и, при желании провести расчёт  $h_{21}$  и  $h_{22}$  с помощью курсорных измерений.

#### 2.4.4. Сохранение выходных характеристик

Наиболее удобным способом сохранения характеристик является их копирование в текстовый редактор. Для этого нужно нажать кнопку с пиктограммой копирования в верхней части окна с графиками, для копирования изображения в буфер и вставить изображения из буфера обмена в открытый документ текстового редактора.

**Важно:** Для дальнейших расчётов необходимо сохранить значения токов базы, для которых были построены характеристики (они приведены в легенде), также может пригодиться значение  $\Delta I_B$ , равное величине **Increment** для **Source 2**.

#### 2.4.5. Расчёт $h_{21}$ и $h_{22}$ с помощью курсорных измерений

Курсорные измерения являются стандартной функцией цифровых осциллографов и заключаются в перемещении по экрану двух меток, в местах пересечения этих меток с графиками считываются значения и отображаются в отдельном экране.

Рассмотрим применение курсорных измерений для случая выходных характеристик, построенных ранее.

Для включения курсорных измерений необходимо нажать соответствующую пиктограмму в окне с построенными характеристиками (рис. 18, поз. 1). После чего на экране появятся курсоры 2 и 2' и окно с результатами измерений 4.

Переместим курсоры в удобное для измерений место (на примере это 3 и 6 вольт на оси  $U_{кз}$ ). Место выбирается произвольно, на линейном участке, заведомо попадающим в рабочий диапазон. Курсоры перемещаются перетаскиванием мышкой за треугольники сверху или вертикальные линии.

Для выбора характеристики, для которой проводятся измерения необходимо однократно нажать на ней мышкой, после чего цвет линии в верхней части окна с результатами измерений (п. 4 на рис. 18) поменяется на цвет выбранной линии.

Рассчитаем параметр  $h_{22} = \Delta I_K / \Delta U_{кз}$ . Этот параметр рассчитывается при неизменном токе базы. Для расчёта выберем фиолетовую характеристику (рис. 18). В окне результатов мы видим, что значения  $x_1 = 6$ ,  $x_2 = 3$ , также приведена разница между ними –  $\Delta x = -3$ . Очевидно, что знак минус в разнице обусловлен расположением курсоров и если их поменять местами, то он исчезнет, т.к. это изображение не идёт в отчёт, то мы можем просто не учитывать минус в дальнейших расчётах. Значения токов для этих точек и разница между ними также приведены в окне результатов:  $y_1 = 1,5173$ ,  $y_2 = 1,4132$ ,  $\Delta y = -104,1356 \cdot 10^{-3}$ . Причина появления знака «—» аналогична вышеприведённой.

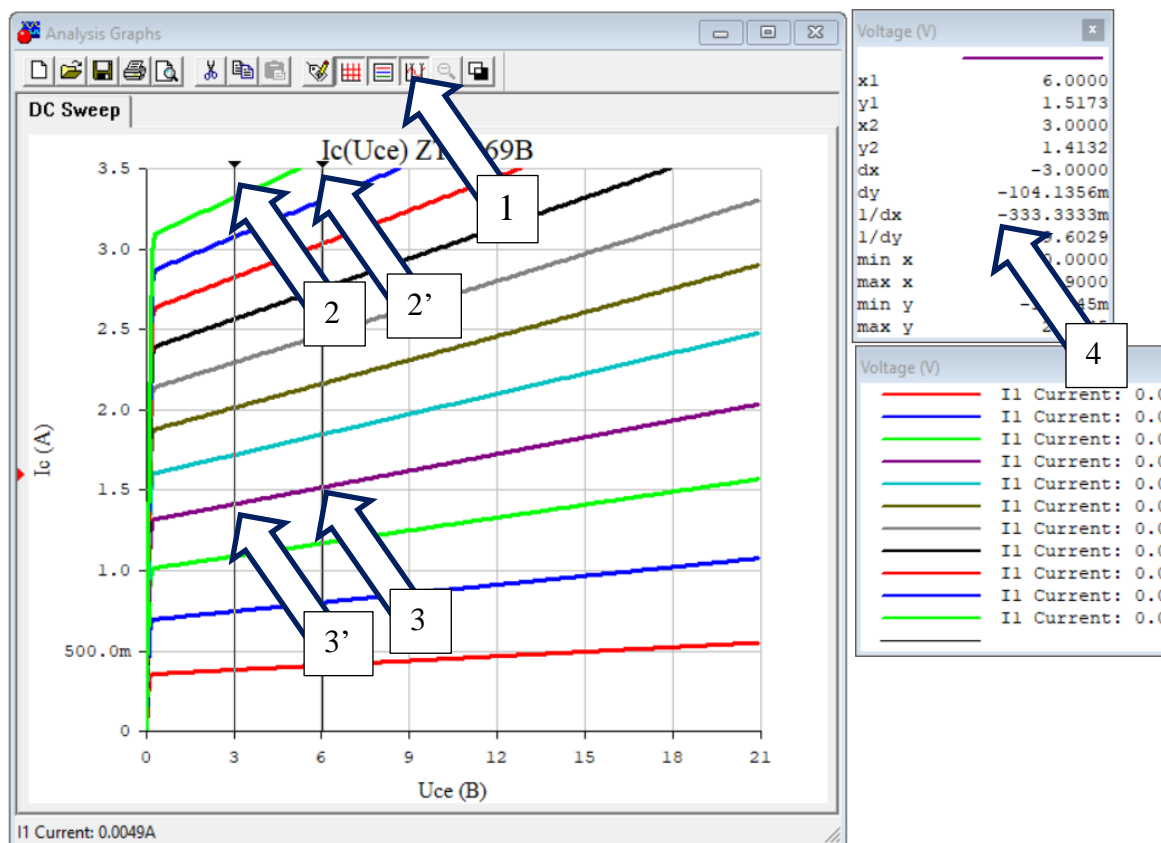


Рис. 18 расчёт  $h$  параметров с помощью курсорных измерений  
 1 – пиктограмма включения курсорных измерений; 2, 2' – измерительные курсоры;  
 3, 3' – точки, для которой проводятся измерения; 4 – окно с результатами измерений

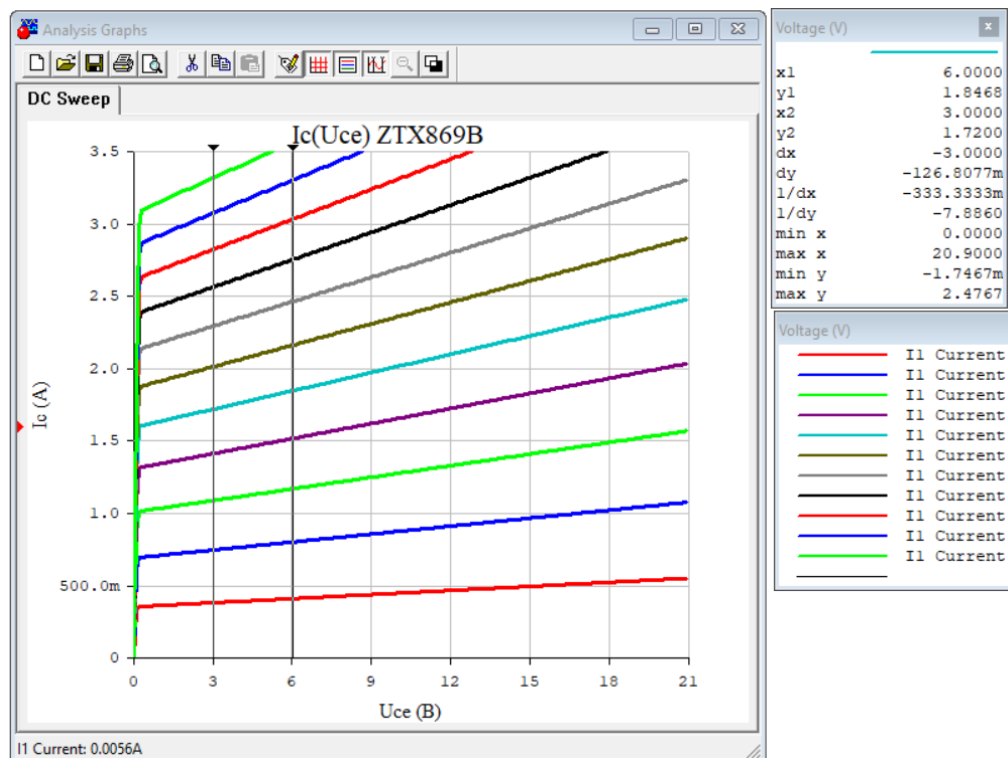


Рис. 19. К получению второго значения для расчёта  $\Delta I_K$

Подставляем полученные значения в формулу и проводим расчёт.

При расчёте параметра  $h_{21} = \Delta I_K / \Delta I_B$  отметим, что  $\Delta I_B$  равен величине **Increment** для **Source 2**. В рассматриваемом примере это  $0,7 \cdot 10^{-3} \text{ А}$ .

Для расчёта  $\Delta I_K$  нам нужны значения тока коллектор для одного напряжения  $U_{КЭ}$  но взятых с двух соседних характеристик. Выберем  $U_{КЭ} = 6 \text{ В}$ , этому напряжению соответствует ток коллектора  $I_K = y1 = 1.5173$ . Для получения второго значения  $I_K$  выберем мышью голубую характеристику и выпишем значения  $y1 = 1.8468$  (рис. 19). Расчёт  $\Delta I_K$  нужно провести самостоятельно.

**Важно:** При составлении отчёта о выполненной работе необходимо отметить точки для которых проводился расчёт h-параметров на прикладываемом к расчёту рисунке.

## 2.5. Построение семейства входных характеристик

### 2.5.1. Подготовка схемы для исследования

Для построение входных характеристик откройте файл **2-In\_tran.ewb** (рис. 20).

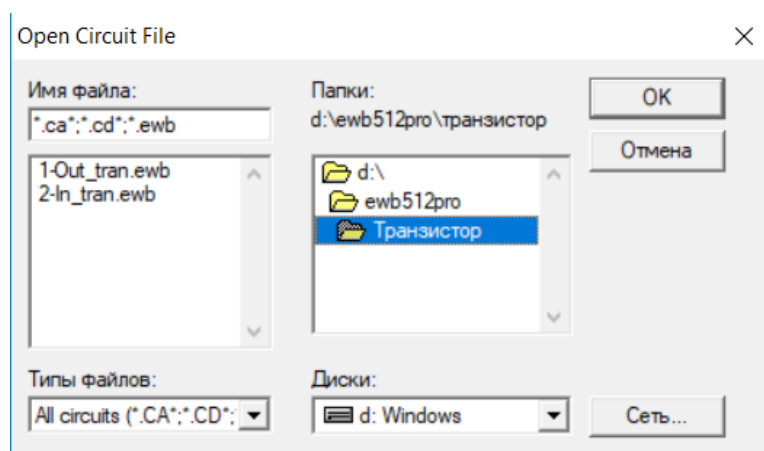


Рис. 20. Файл для построения семейства входных характеристик

Открытый файл будет иметь вид как на рис. 20.

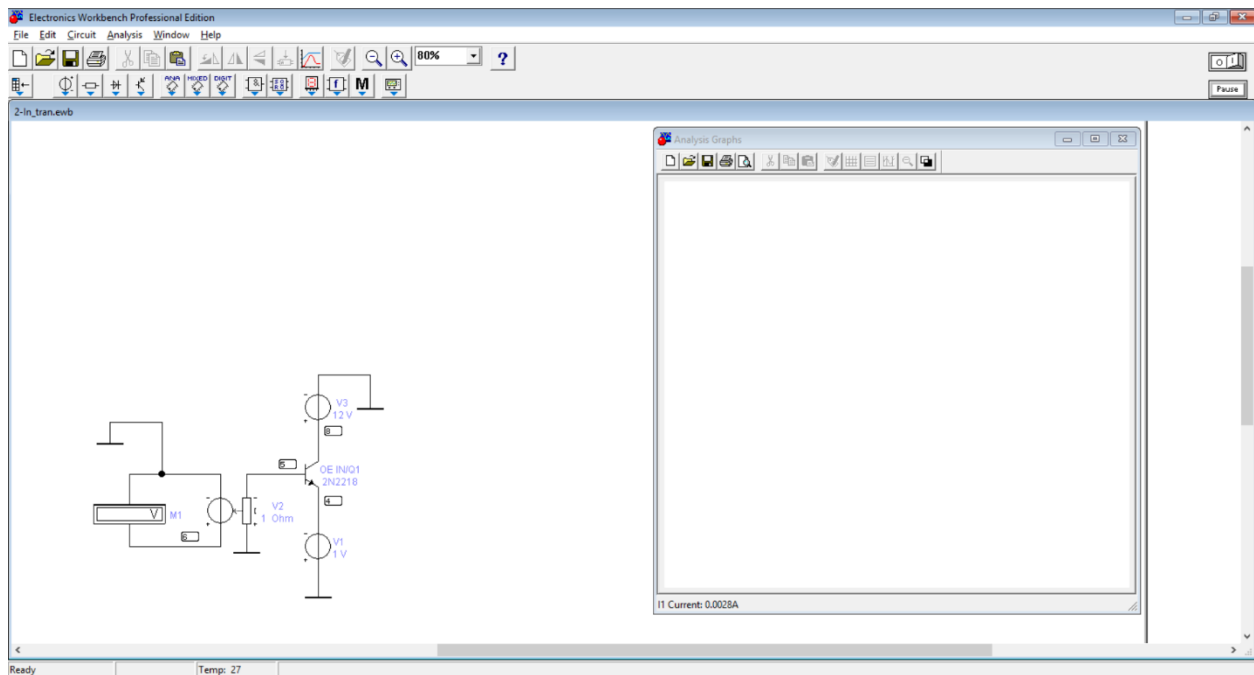


Рис. 20. Файл для построения семейства входных характеристик

После открытия файла нужно имеющейся в схеме транзистор на полученный в задании. Для этого необходимо сделать двойной щелчок на транзисторе и выбрать полученный в задании тип транзистора (рис. 21)

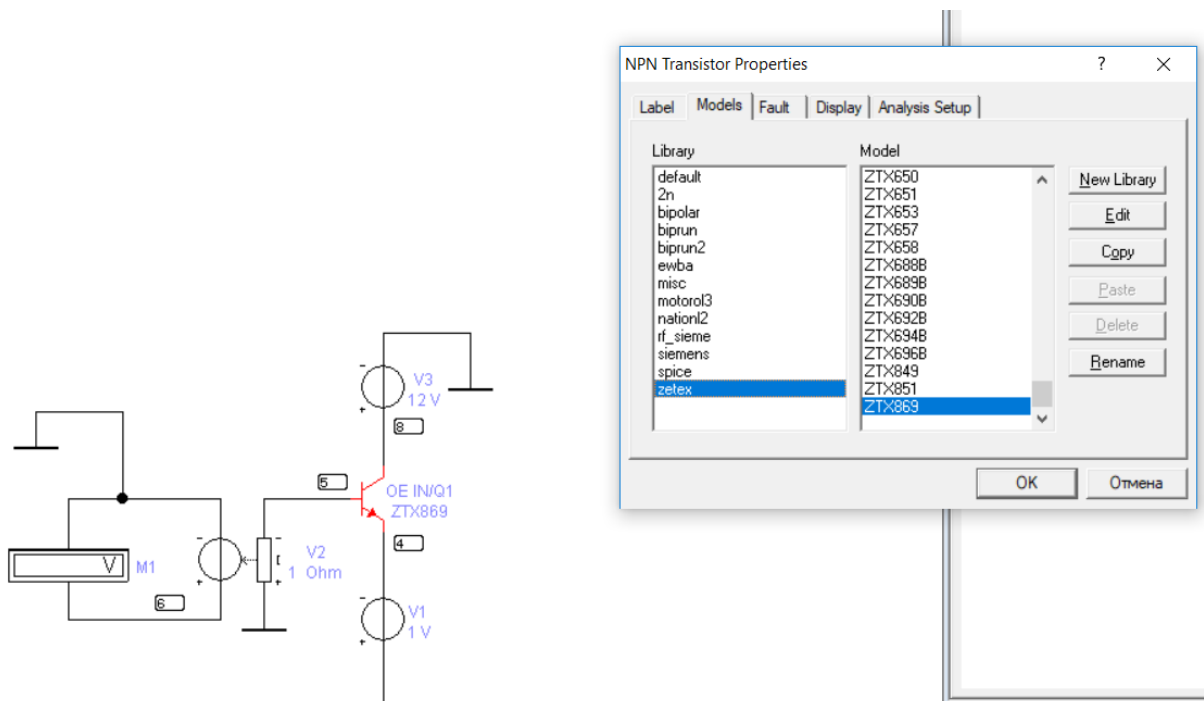


Рис. 21. Выбор типа транзистора

### 2.5.2. Построение характеристик

Для построения характеристик необходимо выбрать пункт **DC Sweep** в меню **Analyses** (Рис. 22)

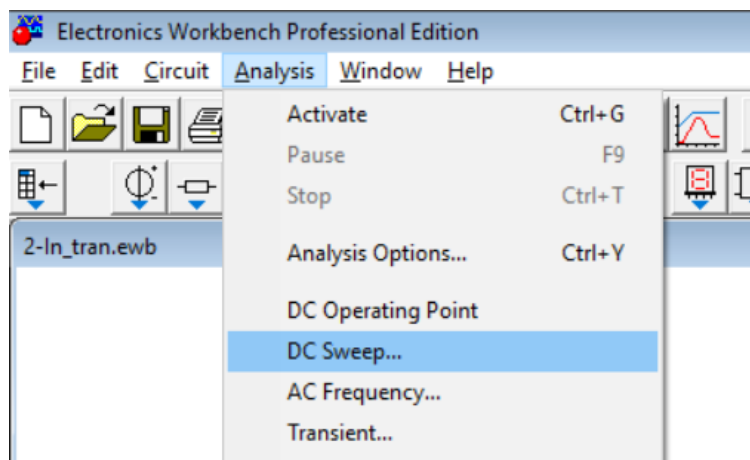


Рис. 22. Выбор пункта **DC Sweep** в меню **Analyses**

В результате мы увидим меню настройки режима анализа по постоянному току **DC Sweep** (Рис. 23).

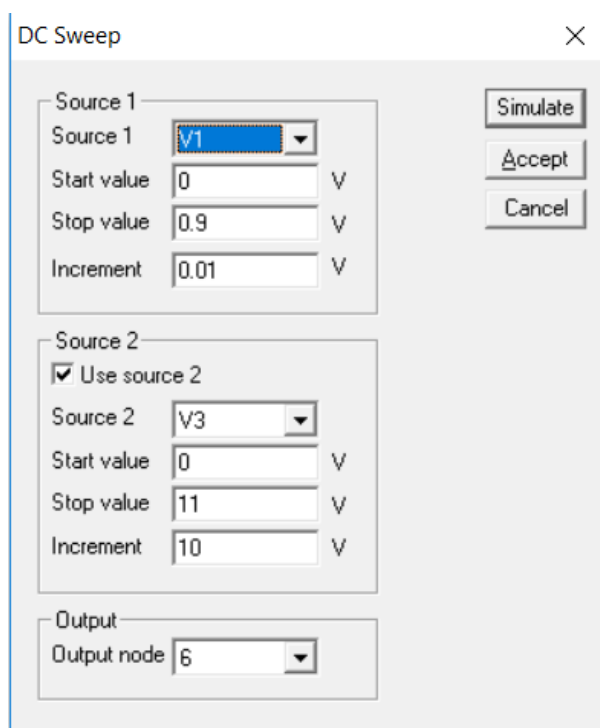


Рис. 23. Настройка режима **DC Sweep**

Раздел **Source 2** позволяет настроить диапазон напряжений коллектор – эмиттер ( $U_{КЭ}$ ), для которого будем строить входные характеристики. Нам достаточно построить две характеристики, одна из которых строится для  $U_{КЭ} = 0$  В, а вторая для напряжения  $U_{КЭ} < U_{КЭ \max}$  В

Выбор значений описан в Таблице 3.

Таблица 3

| Наименование       | Перевод   | Значение | Примечание   |
|--------------------|---|----------|--|
| <b>Start value</b> | Начальное значение                                | 0        | Первая характеристика  |
| <b>Stop value</b>  | Конечное значение                                 | 10       | Вторая характеристика строится для $U_{кэ} < U_{кэ \max}$ В. Выбор обуславливается, в первую очередь, удобством дальнейшего расчёта (характеристики не должны быть слишком близко расположены) |
| <b>Increment</b>   | Шаг с которым проводится построение характеристик | 10 В     | Т.к. строится всего две характеристики, то шаг равен <b>Stop value</b>   |

Раздел **Source 1** позволяет настроить диапазон напряжений база – эмиттер, для которых строятся характеристики. Выбор значений описан в Таблице 4.

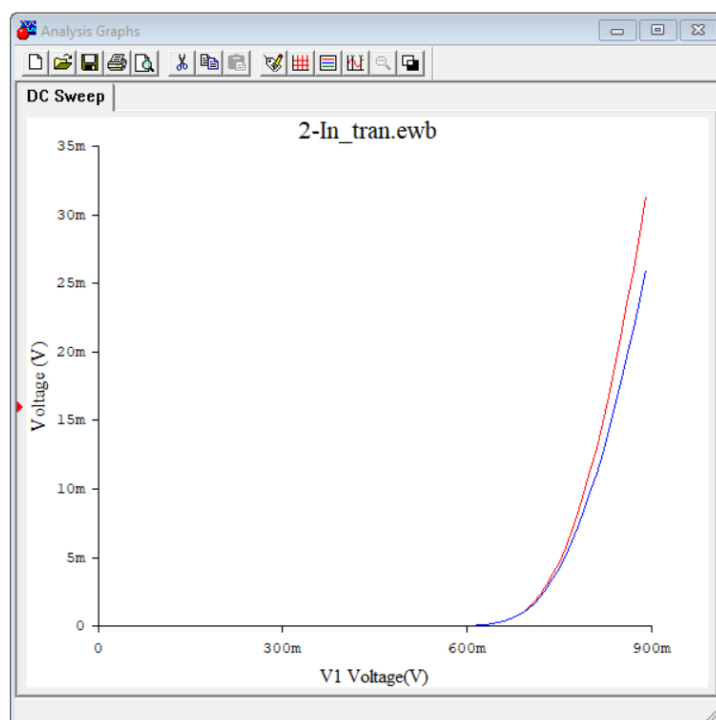
Выбор значения **Stop value** проводится экспериментально, и выбирается исходя из того, что максимальный ток базы на полученной входной характеристике должен быть меньше тока базы, для которого построена верхняя выходная характеристика. Вернувшись к предыдущему пункту, мы увидим, что эта величина равна  $I_{Б \max} = 0,0077$  (зелёная характеристика на рис. 17).

**На первом шаге выбор значений не имеет роли. По результатам расчёта необходима коррекция**

**Таблица 4**

| Наименование       | Перевод   | Значение                     | Примечание   |
|--------------------|---|------------------------------|--|
| <b>Start value</b> | Начальное значение                                | 0                            | Построим характеристики из начала координат  |
| <b>Stop value</b>  | Конечное значение                                 | Подбирается экспериментально | Подбирается так, чтобы характеристика заканчивались немного выше $I_{B \max}$ (определяется по ранее построенным выходным характеристикам) |
| <b>Increment</b>   | Шаг с которым проводится построение характеристик | Подбирается экспериментально | Влияет внешний вид характеристик. Выбирается самостоятельно, приведенное значение ориентировочное.   |

После выбора значений нажимаем кнопку Simulate и анализируем полученный результат (Рис. 24)



*Рис. 24. Результат первой итерации анализа*

На полученном графике видим, что вертикальная ось отградуирована в вольтах, хотя она соответствует току базы. Это обусловлено применяемой схемой и эти значения численно равны току, поэтому в дальнейшем считаем, что эта шкала в амперах.

Вторым важным моментом является то, что максимальный ток базы, для которого приведены характеристики равен  $\sim 30$  мА, в то время как в ранее построенных выходных характеристиках максимальное значение тока базы равно  $I_{B \max} = 0,0077$  (зелёная характеристика на рис. 19). Для исправления этой ситуации необходимо изменить (уменьшить) значение **Stop value** для **Source 1**. Оценим величину  $U_{БЭ}$ , соответствующую току базы  $I_{B \max} = 0,0077$  А = 7,7 мА с помощью курсорных измерений (рис. 25). На рисунке видно, максимальному току базы (координата y2 на рисунке) соответствует напряжение (координата x2 на рисунке), равное 784 мВ.

Исходя из полученных результатов, установим **Stop value** для **Source 1** равным 800 мВ. Результат анализа приведён на рисунке 26.

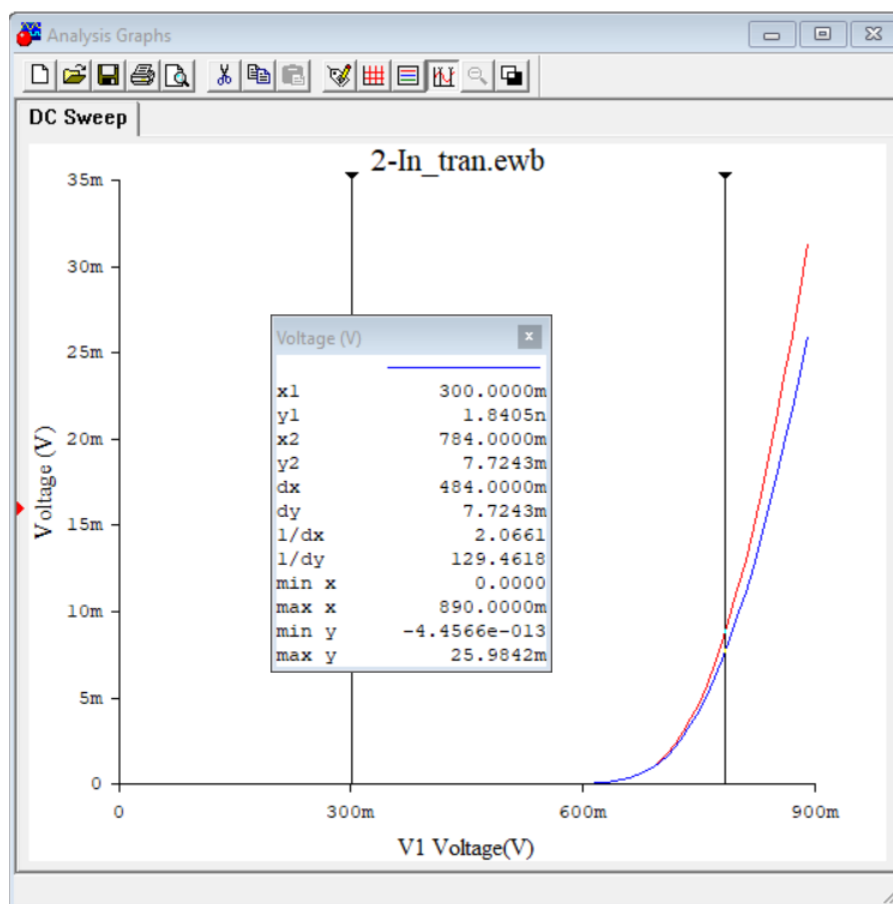
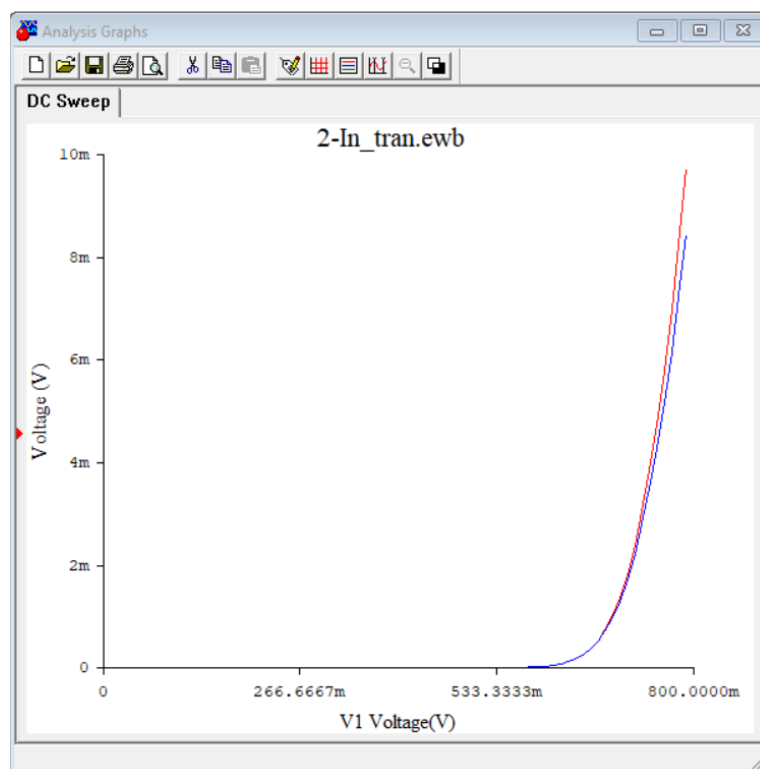
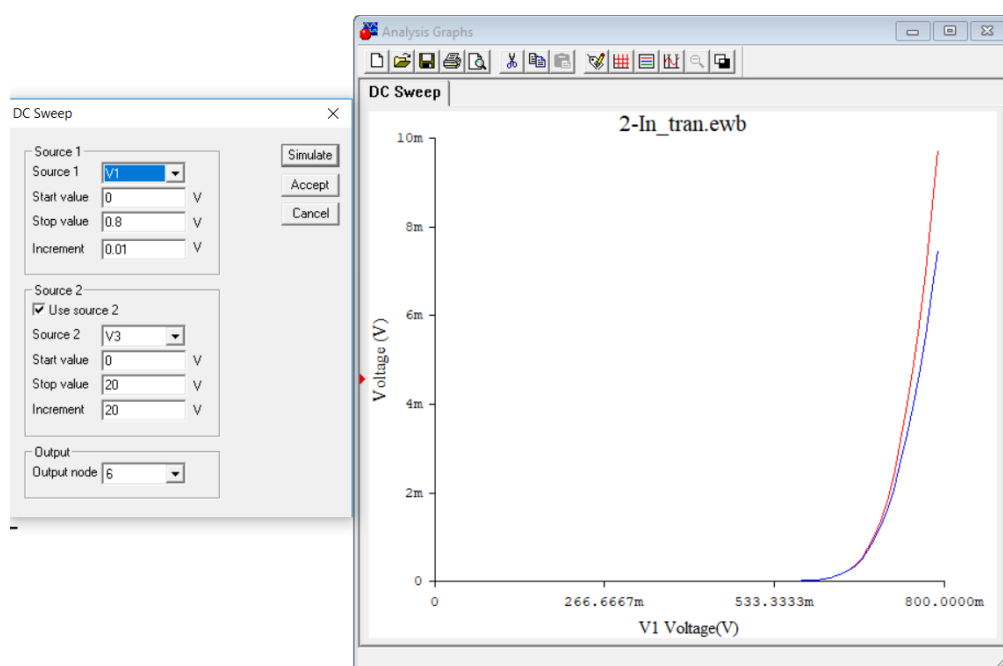


Рис. 25. Определение **Stop value** для **Source 1** с помощью курсорных измерений ( $U_{БЭ}$ , соответствующее максимальному току базы, приблизительно равно 784 мВ)



*Рис. 26. Результат второй итерации анализа*

Полученный результат соответствует предельным значениям, которые мы использовали для расчёта, но неудобен для дальнейшего графического анализа. В частности, характеристики для разных напряжений на коллекторе расположены очень близко друг к другу. Увеличим напряжение на коллекторе до максимальных 20 В. Итоговый результат расчёта приведён на рис. 27.



*Рис. 27. Результат третьей (итоговой) итерации анализа и выбранные значения параметров режима DC Sweep*

### 2.5.3. Настройка внешнего вида характеристик

Для настройки внешнего вида графика выберем пиктограмму **Properties** в верхней части окна с построенными характеристиками (рис. 28)

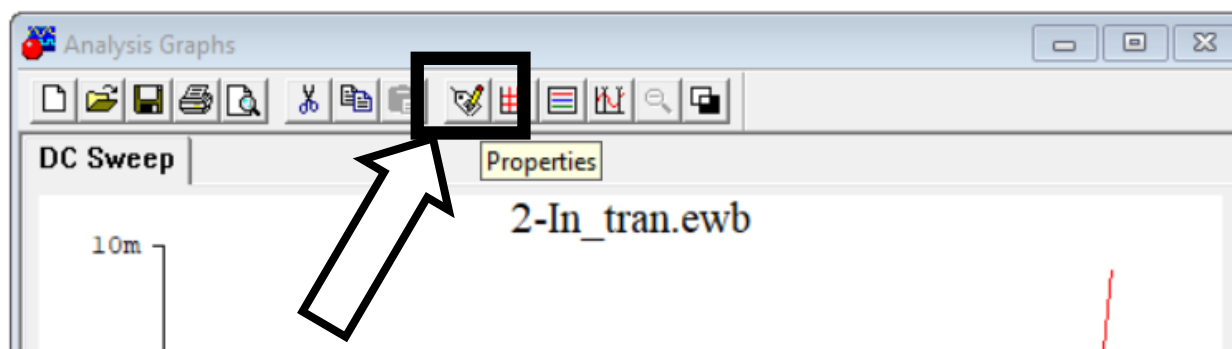


Рис. 28. Пиктограмма «**Properties**»

Первая закладка в открывшемся окне (рис. 29) называется **General**, проведём сразу настройку параметров в ней.

В разделе **Title** можно изменить название графика (запишем «Ib(Ube) ZTX869B»)

В разделе **Grid** можно включить сетку и настроить её параметры

Отметим пункт **Legend On**, т.к. в легенде будут указаны токи базы, для которых строились характеристики. Эти значения потребуются позже.

Проведённые настройки сохраним, нажав кнопку «**Применить**»

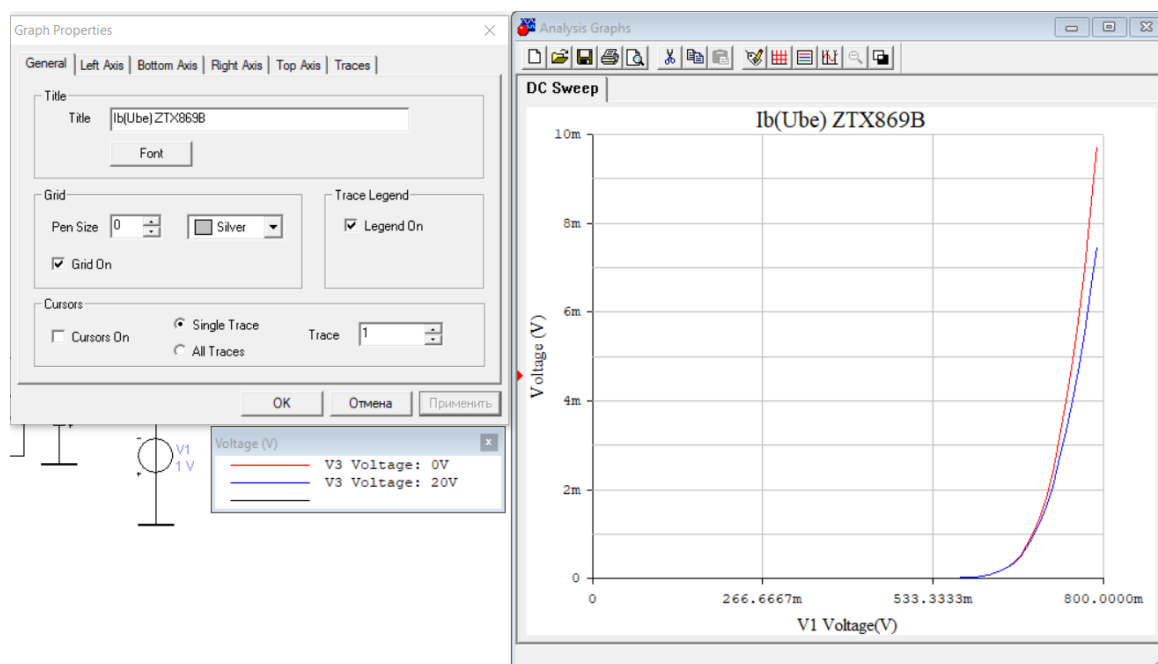


Рис. 29. Настройки **General**

Перейдем в закладку **Left Axis** (рис. 30).

Исправим название вертикальной оси, установив значение **Label** «Ib, A».

Следующий интересующий нас пункт это **Range**. Установим значения **Minimum** равным 0, а **Maximum** – 0.008 (должно не много превышать  $I_{B \max}$ )

Раздел **Division** позволяет управлять количеством показываемых значений на оси, шагом между ними и другими характеристиками.

Сделаем метки на оси каждые 1 мА. Для нашего максимального значения 8 мА это будет  $(8 * 1)$  будет 8 меток. Установим значение поля **Number** равным «7». В поле **Frequency** поставим значение «1»

Поле **Precision** управляет количеством знаков после запятой для значений по оси. Очень важно заменить на отличное от нуля (обычно достаточно 1 или 2), иначе могут быть отображены значения, вводящие в заблуждение. Установим поле **Precision** равным «1».

В поле **Scale** устанавливается множитель для всех значений по оси, установим «1».

Проведённые настройки сохраним, нажав кнопку «Применить»

Внешний вид закладки и проведённые настройки приведены на рис. 30.

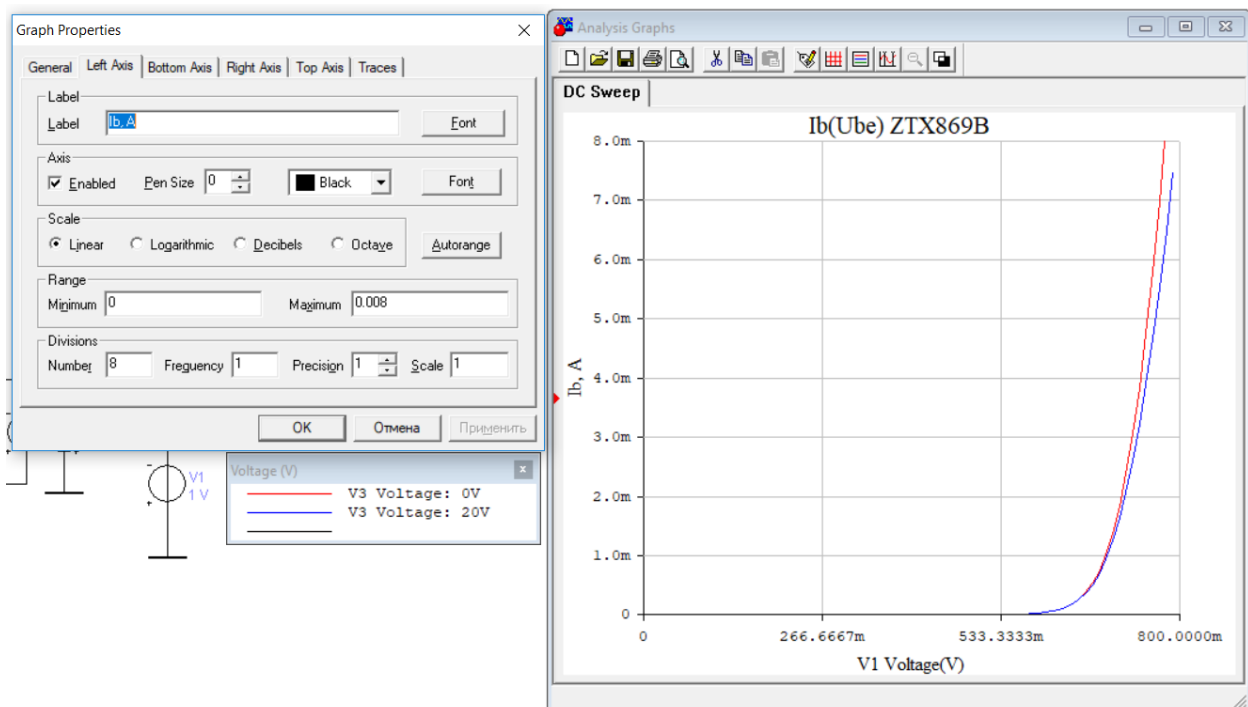


Рис. 30. Настройки **Left Axis**

Перейдем в закладку **Bottom Axis** (рис. 31).

Исправим название вертикальной оси, установив значение **Label** «Ube, В».

Перейдём к пункту **Range**. По графику видно, что до напряжения  $U_{БЭ} = 500 \dots 600$  мВ ток базы фактически равен нулю, исходя из этого установим значения **Minimum** равным 0.6, а **Maximum** оставим без изменений равным 0.8.

В разделе **Division** установим **Number** = 8, **Frequency** = 1, **Precision** = 0, **Scale** = 1.

Проведённые настройки сохраним, нажав кнопку «**Применить**»

Внешний вид закладки и проведённые настрой приведены на рис. 31.

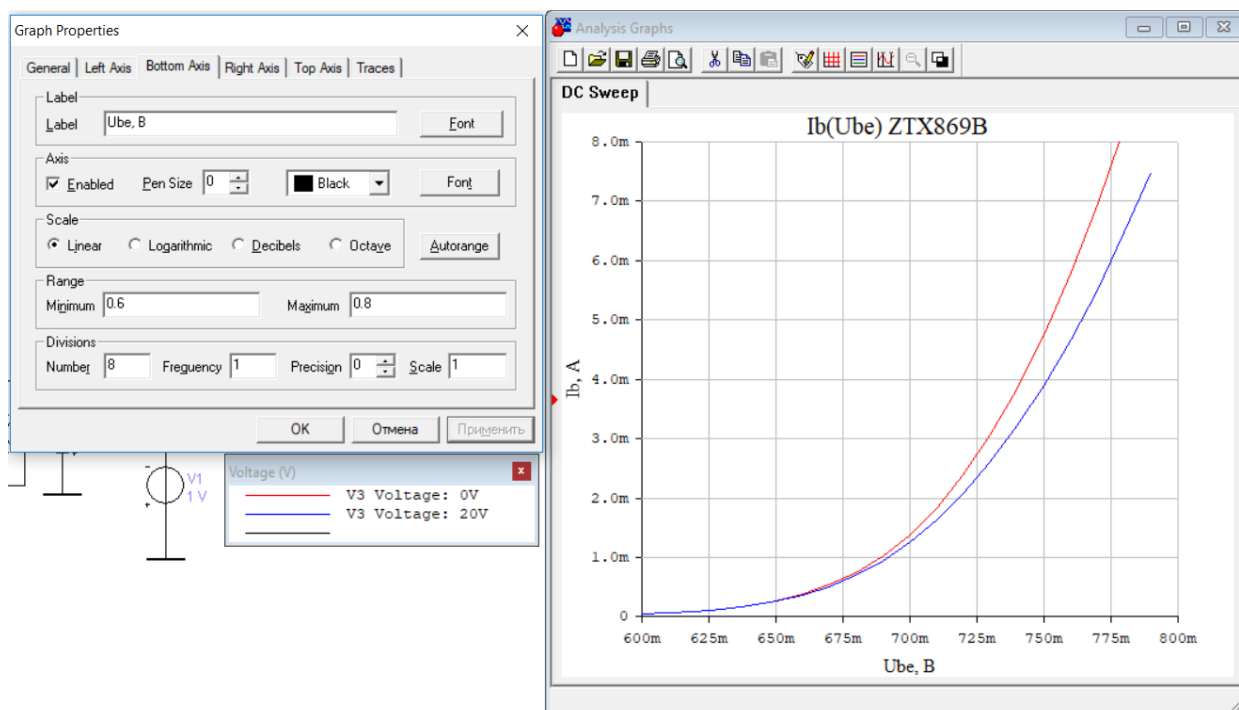


Рис. 31. Настройки **Bottom Axis**

Перейдем в закладку **Traces** (рис. 32).

На этой вкладке желательно настроить толщину линий графиков, т.к. при распечатке на принтере толщины по умолчанию будет недостаточно – графики будут трудноразличимы.

Для настройки нужно установить значение **Pen Size** равным «2». Для выбора линии графика нужно переключать стрелками значения **Trace**.

Проведённые настройки сохраним, нажав кнопку «**Применить**»

Внешний вид закладки и проведённые настрой приведены на рис. 32.

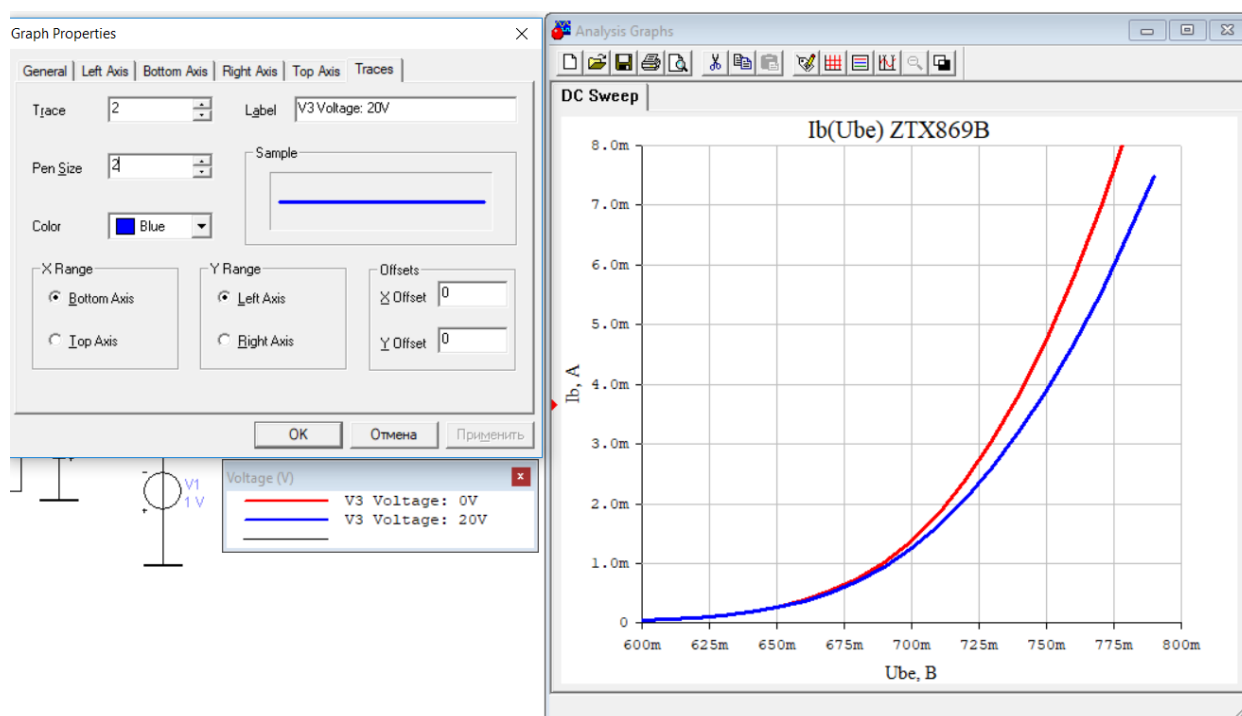


Рис. 32. Настройки **Traces**

На этом построение выходных характеристик закончено, теперь их нужно сохранить, и, при желании провести расчёт  $h_{11}$  и  $h_{12}$  с помощью курсорных измерений.

## 2.5.4. Сохранение выходных характеристик

Наиболее удобным способом сохранения характеристик является их копирование в текстовый редактор. Для этого нужно нажать кнопку с пиктограммой копирования в верхней части окна с графиками, для копирования изображения в буфер и вставить изображения из буфера обмена в открытый документ текстового редактора.

## 2.5.5. Расчёт $h_{11}$ и $h_{12}$ с помощью курсорных измерений

Курсорные измерения являются стандартной функцией цифровых осциллографов и заключаются в перемещении по экрану двух меток, в местах пересечения этих меток с графиками считываются значения и отображаются в отдельном экране.

Рассмотрим применение курсорных измерений для случая выходных характеристик, построенных ранее.

Для включения курсорных измерений необходимо нажать соответствующую пиктограмму в окне с построенными характеристиками (рис. 33, поз. 1). После чего на экране появятся курсоры 2 и 2' и окно с результатами измерений 4.

Переместим курсоры в удобное для измерений место (на примере это 725 и 750 мВ на оси  $U_{БЭ}$ ). Место выбирается произвольно, на линейном или максимально близком к нему участке, заведомо попадающим в рабочий диапазон. Курсоры перемещаются перетаскиванием мышкой за треугольники сверху или за вертикальные линии.

Для выбора характеристики, для которой проводятся измерения необходимо однократно нажать на ней мышкой, после чего цвет линии в верхней части окна с результатами измерений (п. 4 на рис. 15) поменяется на цвет выбранной линии.

Рассчитаем параметр  $h_{11} = \Delta U_{БЭ} / \Delta I_B$ . Этот параметр рассчитывается при неизменном напряжении  $U_{КЭ}$ . Для расчёта выберем кривую  $U_{КЭ} = 20В$ , т.к. она больше соответствует рабочему режиму (для выбора необходимо нажать мышкой на соответствующую кривую). В окне результатов (рис. 33, позиция 4) мы видим, что значения  $U_{БЭ1} = x1 = 725мВ$ ,  $U_{БЭ2} = x2 = 750мВ$ , также приведена разница между ними  $\Delta U_{БЭ} = \Delta x = 25$ . Значения токов для этих точек и разница между ними также приведены в окне результатов:  $I_{Э1} = y1 = 2.3397мА$ ,  $I_{Э2} = y2 = 3.9004мА$ , разница между ними  $\Delta I_B = \Delta y = 1.5608$ .

Подставляем полученные значения в формулу и проводим расчёт.

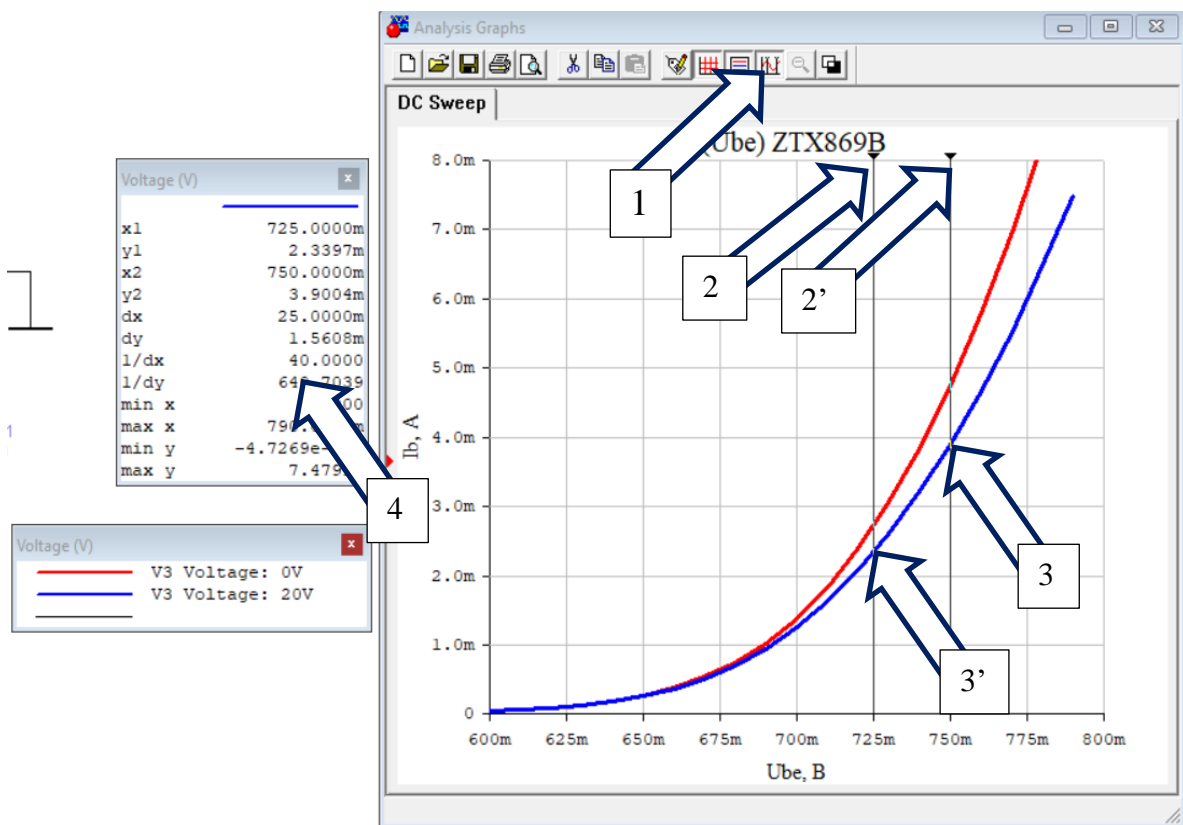


Рис. 33 расчёт  $h$  параметров с помощью курсорных измерений

- 1 – пиктограмма включения курсорных измерений;
- 2, 2' – измерительные курсоры;
- 3, 3' – точки, для которой проводятся измерения
- 4 – окно с результатами измерений

При расчёте параметра  $h_{12} = \Delta U_{БЭ} / \Delta U_{КЭ}$  отметим, что  $\Delta U_{КЭ}$  равен величине **Stop value** для **Source 2**. В рассматриваемом примере это 20 В.

Для расчёта  $\Delta U_{БЭ}$  нам нужны значения  $U_{БЭ}$  для одного тока базы, для этого нам нужно расположить курсоры на обеих характеристиках с одинаковой координатой «у». Выберем  $I_b = 4.0$  мА. Для получения соответствующих значений  $U_{БЭ}$  выберем кривую, соответствующую  $U_{КЭ} = 0$  В, в точку  $y = 4.0$  мА, и получим напряжение на базе  $U_{БЭ1} = x1 = 742$  мВ (рис. 34). Проведя аналогичные операции на второй кривой получим  $U_{БЭ2} = x1 = 751$  мВ (рис. 35).

Расчёт  $\Delta U_{БЭ}$  проводится самостоятельно.

**Важно:** При составлении отчёта о выполненной работе необходимо отметить точки для которых проводился расчёт  $h$ -параметров на прикладываемом к расчёту рисунке.

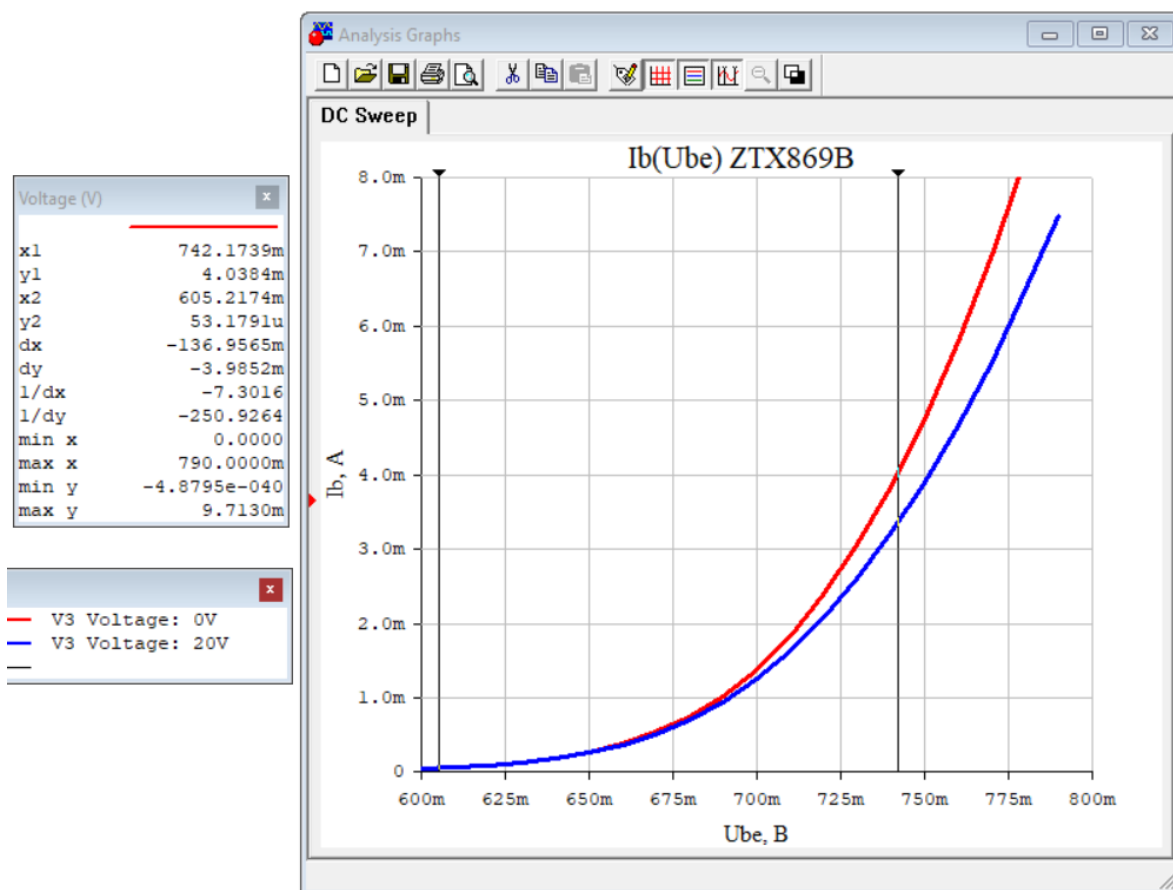


Рис. 34. Получение первого значения для расчёта  $\Delta U_{БЭ}$

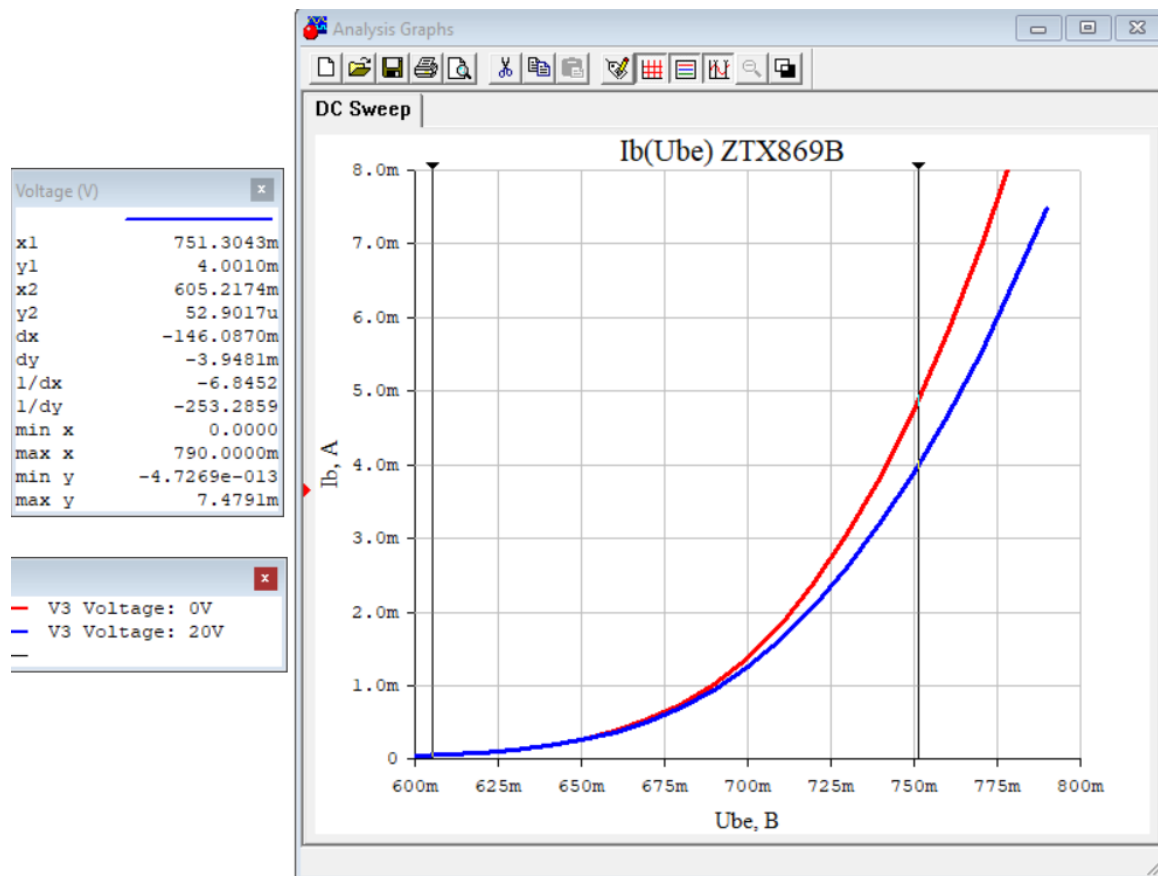


Рис. 35. Получение второго значения для расчёта  $\Delta U_{Б}$