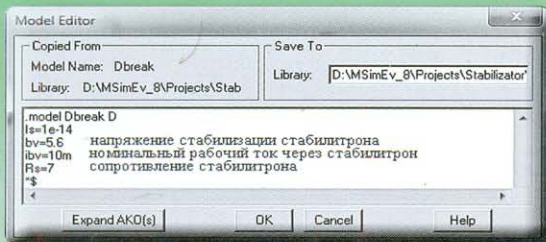




А. П. БАТЕНИНА,  
А. Т. КОБЯК,  
С. В. ЛАГУТИНА

# ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММЫ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ DESIGN LAB 8.0 В КУРСЕ ЭЛЕКТРОНИКИ



МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

---

А.П. БАТЕНИНА, А.Т. КОБЯК, С.В. ЛАГУТИНА

## **Применение программы схемотехнического моделирования Design Lab 8.0 в курсе электроники**

Методическое пособие по курсу «Электроника»  
для студентов, обучающихся по направлению  
«Информатика и вычислительная техника»

Москва  
Издательство МЭИ  
2014

УДК 621.3  
Б 281

*Утверждено учебным управлением МЭИ*

*Подготовлено на кафедре электрофизики информационных систем*

Рецензент – канд.техн.наук, профессор В.М. Геворкян

**Батенина А.П.**

Б 281      Применение программы схемотехнического моделирования Design Lab 8.0 в курсе электроники: методическое пособие / **А.П. Батенина, А.Т. Кобяк, С.В. Лагутина.** – М.: Издательство МЭИ, 2014. – 40 с.

В пособии рассматриваются вопросы применения системы сквозного проектирования Design Lab 8.0 в учебном курсе электроники, приведены примеры и методические рекомендации, позволяющие адаптироваться к данной системе.

В пособии в систематизированном виде изложен необходимый справочный материал, иллюстрируемый примерами.

Для студентов института автоматики и вычислительной техники и института радиоэлектронной техники, а также инженерно-технических работников, занимающихся схемотехническим проектированием в области автоматики, измерительной техники и электротехники.

УДК 621.3

*Учебное издание*

**Батенина Алла Павловна, Кобяк Александр Трофимович,  
Лагутина Светлана Владимировна**

**ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММЫ  
СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
DESIGN LAB 8.0 В КУРСЕ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Методическое пособие по курсу «Электроника»  
для студентов, обучающихся по направлению  
«Информатика и вычислительная техника»

Редактор издательства Н.А. Хрущева

---

Темплан издания МЭИ 2014, метод.	Подписано в печать 25.10.2014
Формат бумаги 60x84/16    Физ. печ. л. 2,5    Тираж 50 экз.    Заказ 11    Изд. № 14-082	

---

Оригинал-макет подготовлен в Издательстве МЭИ,  
111250, Москва, Красноказарменная ул., дом 14  
Отпечатано в ПЦ МЭИ, 111250, Москва, Красноказарменная ул., дом 13

©Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2014

## ВВЕДЕНИЕ

Решение задач по электронике традиционными методами для студентов, начинающих изучать этот курс, с помощью бумаги и ручки представляет определенные трудности. Помогут в этой проблеме программы схемотехнического моделирования [1,...,5], нашедшие применение как в промышленности при разработке схем, так и в учебном процессе. Для студентов такие программы могут служить домашней электротехнической лабораторией, с помощью которой можно рассчитать, посмотреть, проанализировать цепи практически любой сложности. С их помощью можно получить для конкретной задачи правильный ответ, выполнить подготовку к лабораторной работе, а то и саму работу.

Основное внимание в пособии уделено применению программы ***DesignLab 8.0*** для расчета и анализа схем, изучаемых в курсе электроники.

Все примеры строятся на основе редактора проектирования электронных схем ***Schematics***, разработанной фирмой ***MicroSim***. Данный редактор, как показала практика, легче усваивается. Он более удобен по сравнению с другими редакторами, например, ***Capture***, применяемой в системе ***OrCAD*** [8]. Демоверсию программы ***DesignLab 8.0*** можно скачать на сайте кафедры ЭФИС [<http://efis.mpei.ru>].

Примеры, которые приведены в пособии, взяты из описаний лабораторных работ и заданий на курсовые проекты, выполняемых студентами института автоматики и вычислительной техники при изучении курса электроники.

# 1. РАСЧЁТ И АНАЛИЗ СХЕМЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СТАБИЛИЗАТОРА

Схема, приведенная на рис. 1.1, называется параметрическим стабилизатором. Однако эту схему часто используют в цифровой технике для согласования уровней управляющих сигналов. И там эту схему называют ограничителем напряжения.

**Задача 1.** Для параметрического стабилизатора напряжения рассчитать номинальное входное напряжение  $U_{\text{вх ном}}$  и сопротивление балластного резистора  $R_6$  при следующих условиях: выходное напряжение  $U_{\text{вых ном}} = 5,6 \text{ В}$ ; максимальный ток нагрузки  $I_{\text{н макс}} = 15 \text{ мА}$ ; нестабильность (коэффициент пульсации) входного напряжения  $\delta U_{\text{вх}} = k_{\text{п вх}} = 15\%$ .

Расчет схемы может быть выполнен из условия сохранения работоспособности стабилитрона при всех возможных изменениях входного напряжения и нагрузочного тока, то есть из условия  $I_{\text{ст мин}} \leq I_{\text{ст}} \leq I_{\text{ст макс}}$ , что соответствует следующей системе уравнений:

$$\frac{U_{\text{вх мин}} - U_{\text{вых макс}}}{R_6} \geq I_{\text{н макс}} + I_{\text{ст мин}} = \frac{U_{\text{вых макс}}}{R_{\text{н макс}}} + I_{\text{ст мин}}, \quad (1.1)$$

$$\frac{U_{\text{вх макс}} - U_{\text{вых мин}}}{R_6} \leq I_{\text{н мин}} + I_{\text{ст макс}} = \frac{U_{\text{вых мин}}}{R_{\text{н макс}}} + I_{\text{ст макс}}. \quad (1.2)$$

Расчет начинается с выбора стабилитрона. По заданному напряжению  $U_{\text{вых ном}}$  из справочника выберем стабилитрон КС456А, имеющий рабочие параметры:  $U_{\text{ст ном}} = 5,6 \text{ В}$  ( $I_{\text{ст ном}} = 10 \text{ мА}$ ),  $r_{\text{ст}} = 7 \text{ Ом}$ ; и предельные параметры:  $U_{\text{ст мин}} = 5,04 \text{ В}$  ( $I_{\text{ст ном}} = 10 \text{ мА}$ );  $U_{\text{ст макс}} = 6,16 \text{ В}$  ( $I_{\text{ст ном}} = 10 \text{ мА}$ );  $I_{\text{ст мин}} = 3 \text{ мА}$ ;  $I_{\text{ст макс}} = 167 \text{ мА}$ .

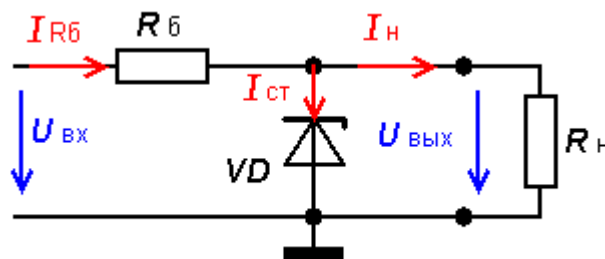


Рис. 1.1. Схема параметрического стабилизатора

Из допустимого диапазона  $I_{\text{ст мин}} \dots I_{\text{ст макс}}$  зададимся минимальным  $I_{\text{ст раб мин}}$  и максимальным  $I_{\text{ст раб макс}}$  рабочим током стабилитрона:

$$I_{\text{ст раб мин}} = 5 \text{ мА}, \quad I_{\text{ст раб макс}} = 50 \text{ мА}.$$

Найдем соответствующие этим токам возможный диапазон изменения напряжения на выходе стабилизатора (см. рис. 1.2).

$$U_{\text{вых мин}} = U_{\text{ст мин}} - (I_{\text{ст ном}} - I_{\text{ст раб мин}}) \cdot r_{\text{ст}} = 5,04 - (10 - 5) \cdot 0,007 = 5,005 \text{ В}.$$

$$U_{\text{вых макс}} = U_{\text{ст макс}} + (I_{\text{ст раб макс}} - I_{\text{ст ном}}) \cdot r_{\text{ст}} = 6,16 + (50 - 10) \cdot 0,007 = 6,44 \text{ В}$$

Значение номинального входного напряжения  $U_{\text{вх ном}}$  и сопротивление резистора  $R_6$  найдем из системы уравнений (1.1) – (1.2):

$$\frac{(1 - \delta U_{\text{вх}}) \cdot U_{\text{вх ном}} - U_{\text{вых макс}}}{R_6} \geq I_{\text{н макс}} + I_{\text{ст раб мин}} = \frac{U_{\text{вых макс}}}{R_{\text{н мин}}} + I_{\text{ст раб мин}},$$

$$\frac{(1 + \delta U_{\text{вх}}) \cdot U_{\text{вх ном}} - U_{\text{вых мин}}}{R_6} \leq I_{\text{н мин}} + I_{\text{ст раб макс}} = I_{\text{ст раб макс}}.$$

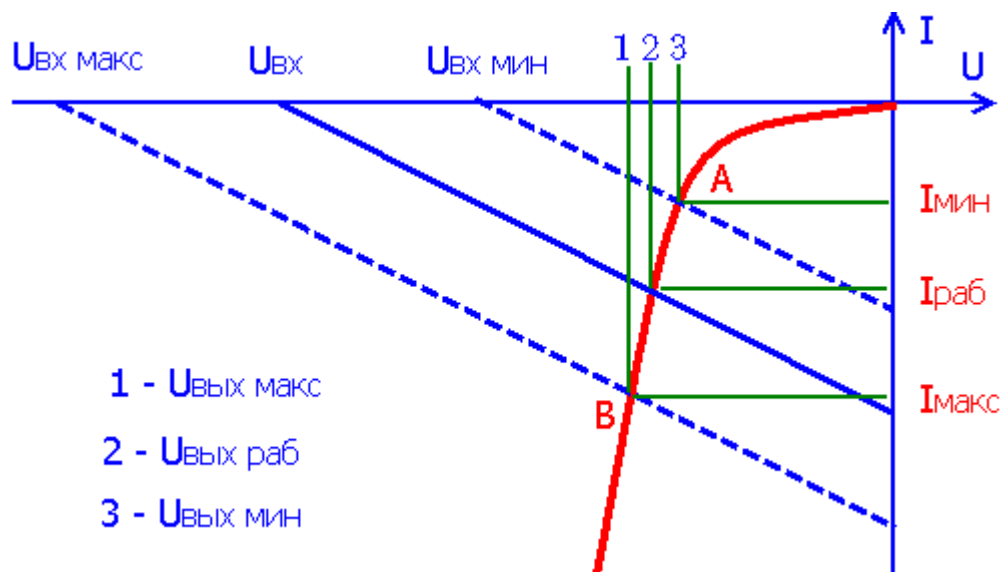


Рис. 1.2. К расчету параметров стабилизатора

Решение системы линейных уравнений дает:  $R_6 = 162 \text{ Ом}$ ;  $U_{\text{вх ном}} = 11,4 \text{ В}$ .

Принимаем стандартные значения:  $R_6 = 160 \text{ Ом}$  и  $U_{\text{вх ном}} = 12 \text{ В}$ .

Минимальное и максимальное входные напряжения, соответственно равны:

$$U_{\text{вх мин}} = 0,85 \cdot U_{\text{вх ном}} = 10,2 \text{ В}, \quad U_{\text{вх макс}} = 1,15 \cdot U_{\text{вх ном}} = 13,8 \text{ В}.$$

Сделаем проверку, лежат ли в рабочем диапазоне токи выбранного стабилитрона. Для этого определим токи  $I_{\text{ст раб мин}}$  и  $I_{\text{ст раб макс}}$ .

$$I_{\text{ст раб мин}} = \frac{U_{\text{вх мин}} - U_{\text{вых макс}}}{R_6} - I_{\text{н макс}} = \frac{10,2 - 6,44}{0,160} - 15 = 8,5 \text{ мА},$$

$$I_{\text{ст раб макс}} = \frac{U_{\text{вх макс}} - U_{\text{вых мин}}}{R_6} - I_{\text{н мин}} = \frac{13,8 - 5,005}{0,160} = 55 \text{ мА}.$$

Полученные значения лежат в допустимом диапазоне  $I_{\text{ст мин}} \dots I_{\text{ст макс}}$ .

Коэффициент стабилизации найдем по приближенной формуле:

$$K_{U_{\text{ст}}} = \frac{U_{\text{вых ном}} \cdot R_6}{U_{\text{вх ном}} \cdot r_{\text{ст}}} = \frac{5,6 \cdot 160}{12 \cdot 7} = 10,67.$$

Выходное сопротивление стабилизатора  $R_{\text{вых}} = r_{\text{ст}} = 7 \text{ Ом}$ .

При моделировании данной схемы требуется доказать ее работоспособность, снять передаточную и нагрузочную характеристики и по ним определить основные параметры стабилизатора: коэффициент стабилизации и выходное сопротивление.

Анализ схемы с помощью программы **Design Lab** начинается с вызова графического редактора **Schematics**, с помощью которого собирается схема параметрического стабилизатора (рис. 1.3).

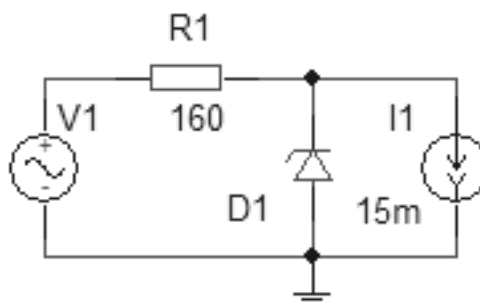


Рис. 1.3. Рабочая схема для исследования работы параметрического стабилизатора

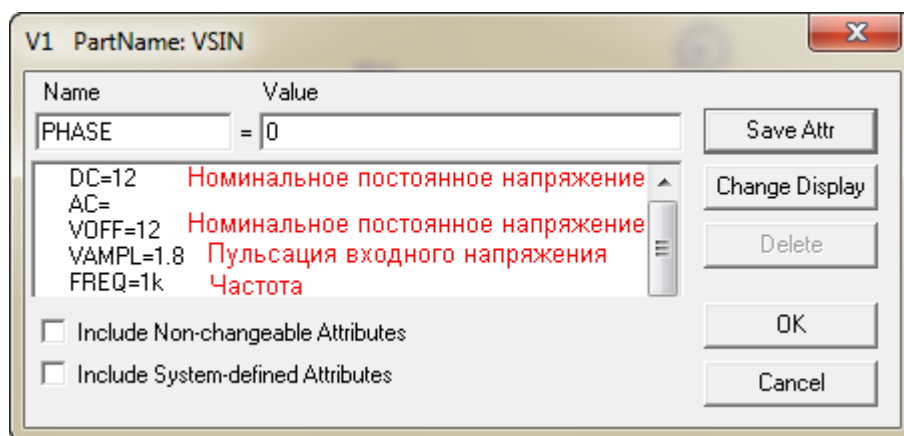
Схема включает: источник входного напряжения, который моделируется с помощью источника ***VSIN***, стабилитрон – ***DbreakZ***, резистор – ***R*** и источник постоянного тока ***IDC***, моделирующий нагрузку. В схему обязательно следует включить землю ***EGND***.

Параметры элементов схемы должны соответствовать номинальному режиму. Для резистора указать его номинальное сопротивление, а для источника тока нагрузки – его максимальное значение. Для источника напряжения ***VSIN*** следует указать (рис. 1.4) его номинальное значение (в нашем примере  $DC = V_{off} = 12$ ), и задать амплитуду колебаний из-за неустойчивости напряжения (в нашем примере  $V_{ampl} = 12 \cdot 15\% = 1,8$ ). Частоту колебаний ***Freq*** можно выбрать произвольно, например, 1 кГц, так как в задании она не указана.

Затем необходимо сохранить схему на рабочем диске в рабочей папке, например, D:\Student\file, где ***file*** – **любое имя, не включающее кириллицу**.

Далее для стабилитрона необходимо указать параметры модели. Для этого необходимо щелкнуть стабилитрон один раз (он окрасится). Для указания параметров модели необходимо войти в интерфейсный диалог ***Edit - Model – Edit Instance Model (Text)...*** В окне параметров модели ввести параметры стабилитрона: напряжение стабилизации стабилитрона, номинальный рабочий ток через стабилитрон, сопротивление стабилитрона (рис. 1.5). Эти параметры, как правило, задаются в справочниках.

Чтобы проверить работоспособность схемы, надо, меняя входное напряжение и ток нагрузки, смоделировать ее для номинального (рис. 1.6, б) и предельных режимов (рис. 1.6, а, в).



**Рис. 1.4. Параметры источника входного напряжения**



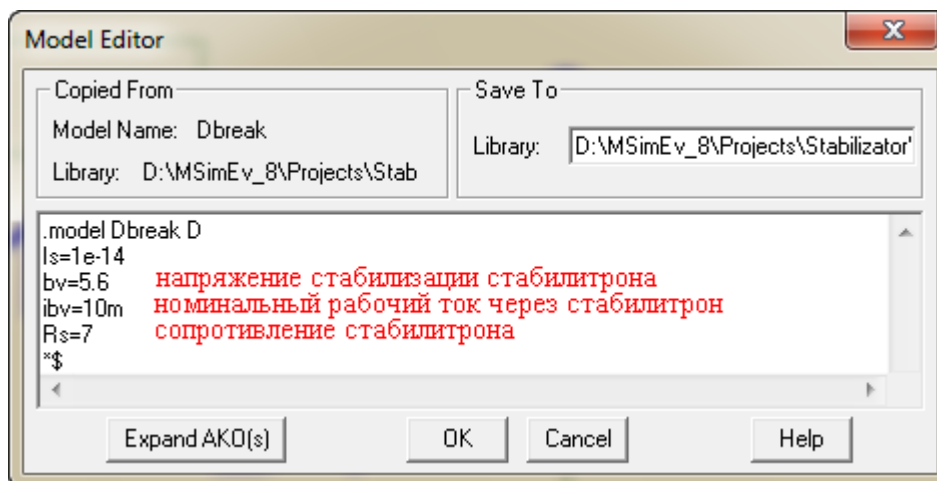


Рис. 1.5. Параметры модели стабилитрона

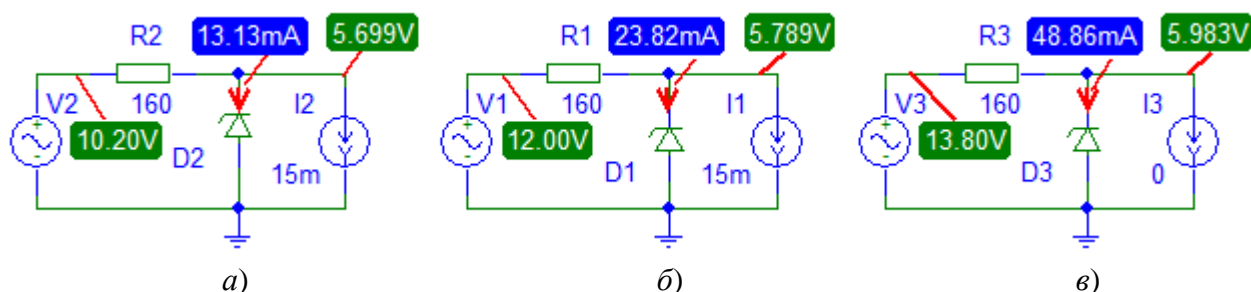





Рис. 1.6. Моделирование рабочего режима

Моделирование показало, что выходное напряжение и ток через стабилитрон находятся в допустимых пределах.

Режим работы схемы	Выходное напряжение, В (5,005...6,44)	Ток стабилитрона, мА (3...167)
Предельный режим: $U_{\text{вх}}=10,2\text{В}$ , $I_{\text{н}}=15\text{мА}$	5,699	13,13
Номинальный режим: $U_{\text{вх}}=12\text{В}$ , $I_{\text{н}}=15\text{мА}$	5,789	23,82
Предельный режим: $U_{\text{вх}}=13,8\text{В}$ , $I_{\text{н}}=0\text{мА}$	5,983	48,86

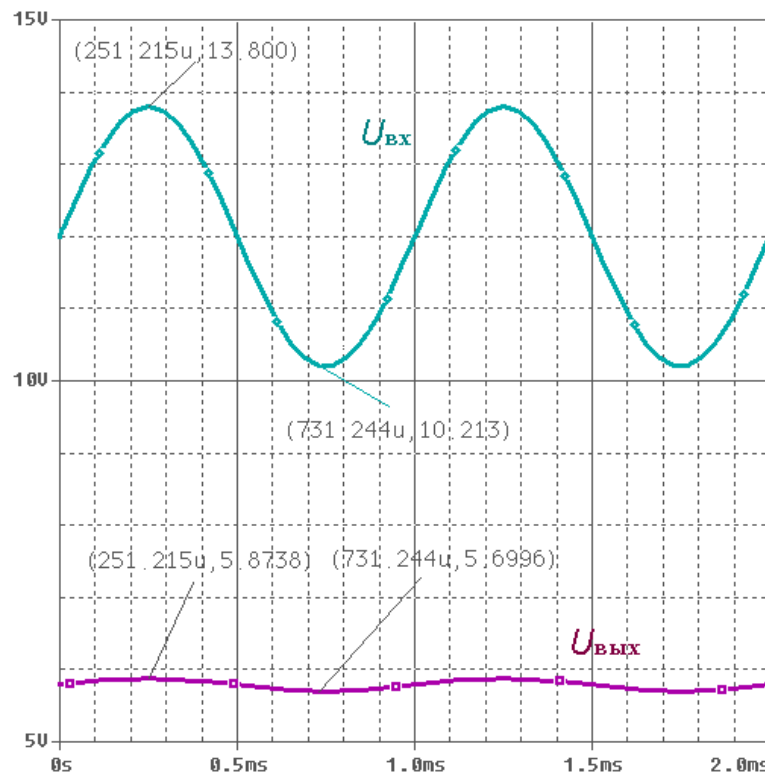
Наглядно работоспособность схемы можно проверить в динамическом режиме. Для вывода осциллограмм необходимо подключить маркеры напряжения  к выходу схемы и к источнику входного напряжения. С помощью иконки  войти в режим установки анализа. Здесь отключить режим *Bias Point Detail* и войти в режим *Transient*. В диалоговом режиме установить время анализа 4мс ( $\text{Final Time} = 4\text{м}$ ) и максимальный шаг

интегрирования равным 40мкс ( $Step\ Ceiling=40u$ ). Запустив программу расчета ( $F11$  или ) , на интервале четырех периодов рассчитаем переходной процесс (рис. 1.7). На полученных осциллограммах входного напряжения и напряжения на нагрузке с помощью электронного курсора найдем точки  $U_{вх\ мин}$ ,  $U_{вх\ макс}$ ,  $U_{вых\ мин}$ ,  $U_{вых\ макс}$ .


По этим данным рассчитаем коэффициент пульсаций на выходе схемы  $k_{п2}$  и коэффициент стабилизации  $k_{ст}$ .

$$k_{п2} = \frac{U_{вых\ макс} - U_{вых\ мин}}{U_{вых\ макс} + U_{вых\ мин}} = \frac{5,8738 - 5,6996}{5,8738 + 5,6996} = \frac{0,1742}{11,5734} = 0,015.$$

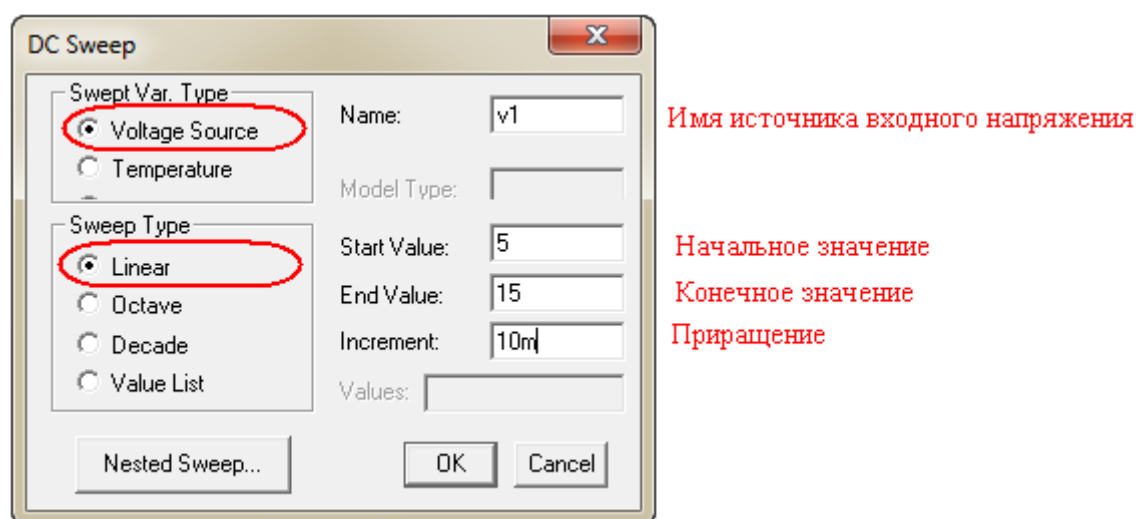
$$k_{ст} = \frac{k_{п1}}{k_{п2}} = \frac{0,15}{0,015} = 10.$$



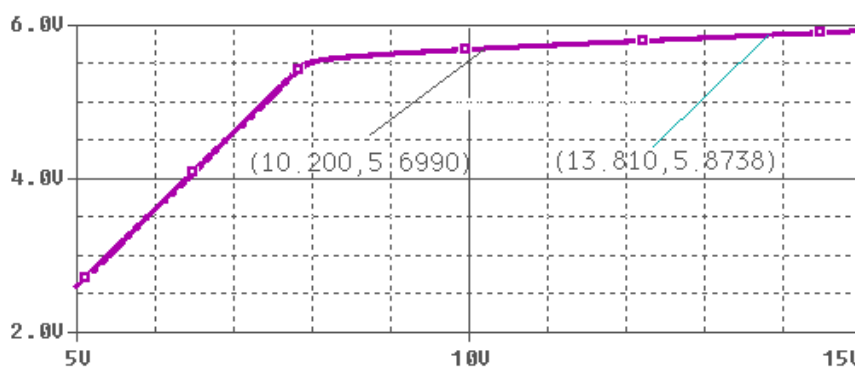
**Рис. 1.7. Осциллограммы входного и выходного напряжения в схеме стабилизатора при наличии нестабильности входного напряжения**

Важной характеристикой параметрического стабилизатора является передаточная характеристика  $U_{вых}(U_{вх})$ . Чтобы снять эту характеристику надо с помощью иконки  войти в режим установки анализа, отключить режим *Transient* и войти в режим *Sweep DC*.... В диалоговом режиме (рис. 1.8) установить необходимые параметры. Маркер напряжения следует оставить

только на выходе схемы. Затем провести расчет схемы и получить передаточную характеристику (рис. 1.9). По характеристике определяем изменение выходного напряжения ( $U_{\text{вых мин}}$  и  $U_{\text{вых макс}}$ ) в заданных границах входного (10,2В ...13,8В). По этим данным определяем коэффициент пульсаций на выходе  $k_{\text{п2}}$  и коэффициент стабилизации  $k_{\text{ст}}$ . Можно видеть, что результаты совпадают с предыдущими расчетами.

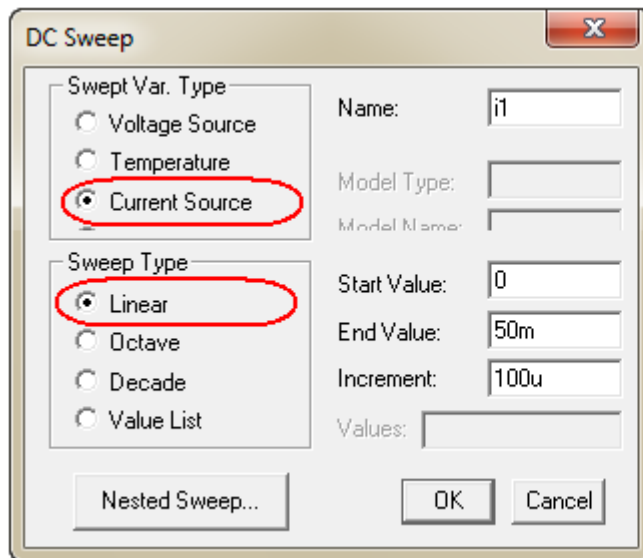


**Рис. 1.8. Установки для снятия передаточной характеристики**



**Рис. 1.9. Передаточная характеристика стабилизатора**

Другой важной характеристикой является нагрузочная. Чтобы снять эту характеристику надо в режиме *Sweep DC...* изменить параметры анализа (рис. 1.10).



Имя источника тока нагрузки

Начальное значение тока

Конечное значение тока

Приращение тока

Рис. 1.10. Установки для расчета нагрузочной характеристики

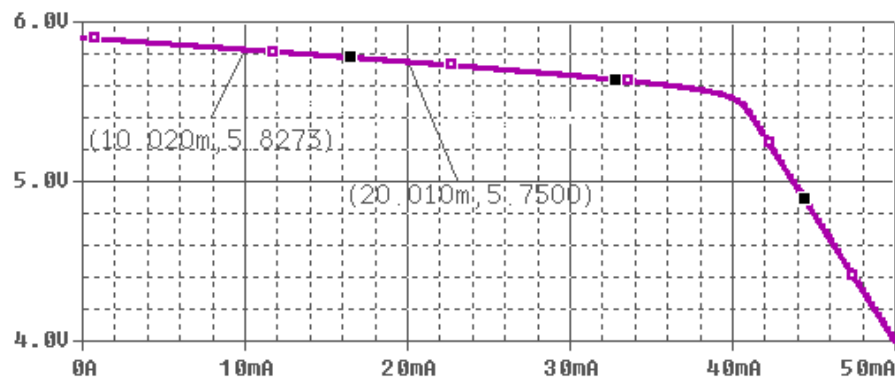


Рис. 1.11. Нагрузочная характеристика стабилизатора

Проводим расчет схемы и получаем нагрузочную характеристику (рис. 1.11).

По характеристике определяем по наклону рабочего участка выходное сопротивление стабилизатора:

$$R_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta I_{\text{н}}} = \frac{5,8273 - 5,750}{20,01 - 10,02} = \frac{0,0773}{11,5734} = 7,7 \text{ Ом}.$$

По передаточной характеристике можно определить минимально возможное входное напряжение ( $U_{\text{вх мин доп}} \approx 8 \text{ В}$ ), а по нагрузочной характеристике – максимально допустимый ток нагрузки ( $I_{\text{н макс доп}} \approx 40 \text{ мА}$ ).

## 2. РАСЧЁТ И АНАЛИЗ СХЕМЫ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

Схема усилительного каскада ОЭ приведена на рис. 2.1. В задачах анализа обычно рассчитывают режим работы транзистора, основные параметры усилительного каскада и исследуют его характеристики.

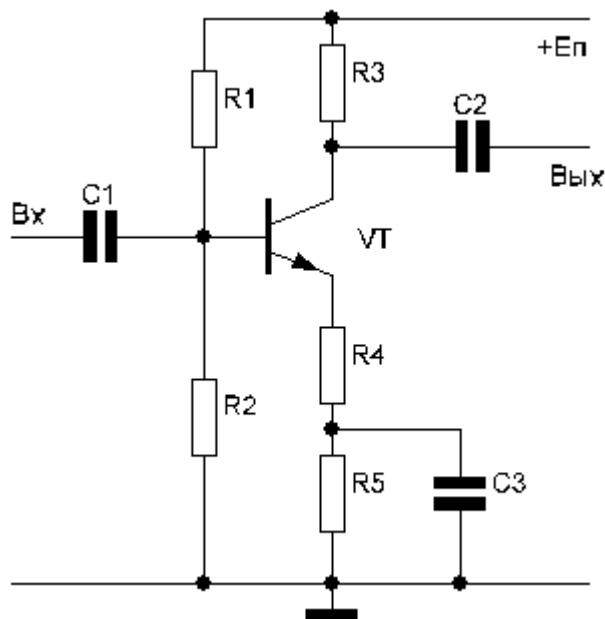


Рис. 2.1. Схема усилительного каскада ОЭ

**Задача 2.** Для схемы усилительного каскада ОЭ с параметрами  $R_1=7,5\text{кОм}$ ,  $R_2=2\text{кОм}$ ,  $R_3=200\text{ Ом}$ ,  $R_4=20\text{ Ом}$ ,  $R_5=30\text{ Ом}$ ,  $C_1=10\text{мкФ}$ ,  $C_2=10\text{мкФ}$ ,  $C_3=100\text{мкФ}$ ,  $E_{\pi}=10\text{В}$  выполненного на основе транзистора КТ315В определить рабочий режим транзистора. Для случая нагрузки  $R_{\text{н}}=5\text{кОм}$  и источника сигнала с внутренним сопротивлением  $R_{\text{г}}=250\text{ Ом}$  определить основные параметры схемы: коэффициент усиления, входное и выходное сопротивление каскада.

### 2.1. Расчет рабочего режима

*Аналитически рабочий режим* схемы усилительного каскада ОЭ (рис.2.1) можно определить из следующей системы уравнений:

$$E_{\text{пит}} = I_{\text{к}} R_3 + U_{\text{кэ}} + I_{\text{э}} (R_4 + R_5) , \quad (2.1)$$

$$E_{\text{см}} = I_{\text{б}} R_{\text{см}} + U_{\text{бэ}} + I_{\text{э}} (R_4 + R_5) , \quad (2.2)$$

где  $E_{см}$  и  $R_б$  – эквивалентный источник питания и эквивалентное сопротивление в цепи базы, которые соответственно равны:

$$E_{см} = E_{п} R_2 / (R_1 + R_2), \quad (2.3)$$


$$R_{см} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2). \quad (2.4)$$

В систему уравнений необходимо также включить уравнения, описывающие работу транзистора в активном режиме:

$$I_э = I_к + I_б, \quad I_к = \beta I_б, \quad U_{бэ} \approx 0.7 \text{ В}. \quad (2.5)$$

Последнее равенство учитывает, что в нормальном активном режиме напряжение  $U_{бэ}$  существенно не меняется. Коэффициент усиления транзистора можно узнать из справочных данных. В справочниках обычно указывается технологический диапазон этого параметра от  $\beta_{мин}$  до  $\beta_{макс}$ . В расчетах же рекомендуется брать его среднее значение. Для транзистора КТ315В среднее значение  $\beta=75$ . После решения системы (2.1) – (2.5) получим:  $I_б = 261 \text{ мкА}$ ,  $I_к = 19,6 \text{ мА}$ ,  $U_{кэ} = 5,09 \text{ В}$ .

Однако интереснее получить решение графически по вольтамперным характеристикам транзистора. Но, к сожалению, найти характеристики транзисторов в современных справочниках (да и в Интернете тоже) невозможно. Поэтому получаем входные и выходные характеристики, используя программу **DesignLab** и модель транзистора КТ315В. Параметры модели транзистора можно найти в Интернете на сайтах производителей.

Для получения входной характеристики  $I_б(U_{бэ})$  для  $U_{кэ}=5\text{В}$  собираем схему, показанную на рис. 2.2. При этом для установки управляющего тока в цепи базы транзистора и напряжения на коллекторе из библиотеки символьных компонентов выбираются постоянные источники **IDC** и **VDC**. Для вывода напряжения  $U_{бэ}$  устанавливаем на базе транзистора маркер . Так как в библиотеке компонентов в демо-версии транзистор КТ315В отсутствует, выбираем транзистор *n-p-n*-типа **Qbreak**. После сохранения схемы под оригинальным именем, помечаем транзистор, щелкнув его один раз, и входим в интерфейсный диалог **Edit - Model - Change Model Reference...** и заменяем имя модели транзистора **QbreakN** на **KT315V** (все буквы латинские !!!). Это можно сделать, только если модель есть в библиотеке пользователя, и библиотека подключена к системе. В противном случае предварительно с помощью любого

текстового редактора предварительно создается файл модели транзистора, который потом подключается к данной схеме.

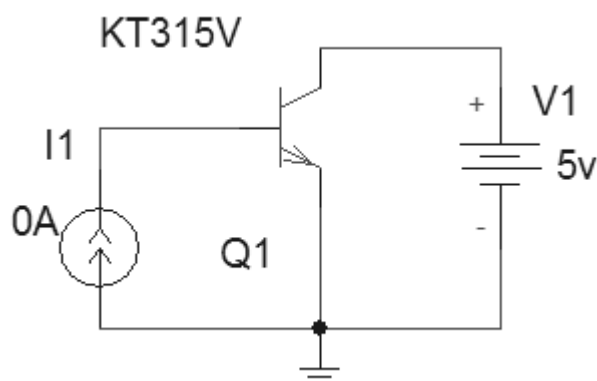


Рис. 2.2. Схема для снятия входной и выходной характеристик транзистора

Можно также просто установить параметры модели транзистора в окне, которое откроется по команде **Edit - Model - Edit instance model (text)...** (рис. 2.3).

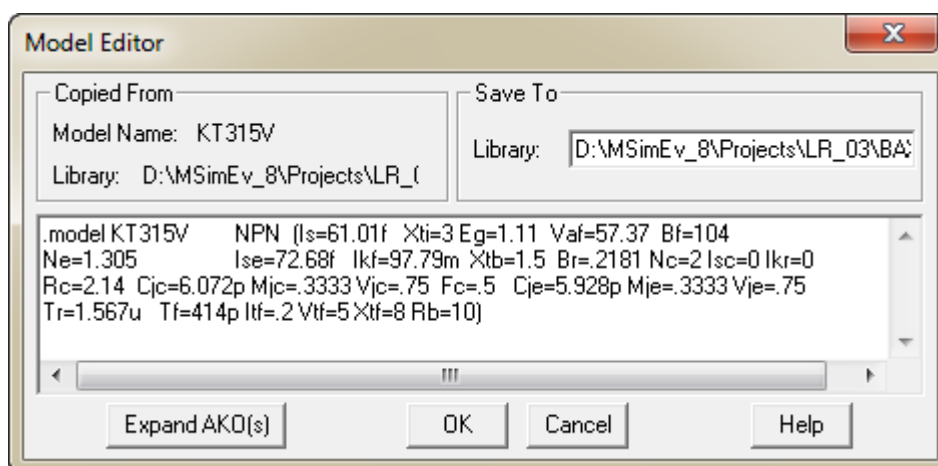


Рис. 2.3. Задание параметров транзистора KT315B

Чтобы получить входную характеристику биполярного транзистора,  $U_{бэ}(I_б)$ , задаем режим расчета напряжения  $U_{бэ}$  при изменении тока  $I_б$  при фиксированном значении напряжения  $U_{кэ}=5В$ . С этой целью отключаем режим расчета схемы по постоянному току *Bias Point Detail* и устанавливаем режим расчета статических характеристик **DC Sweep...** (рис.2.4). После выхода из диалога *DC Sweep...* запускаем схему на расчет и получаем входную характеристику  $U_{бэ}(I_б)$ . Изменяем масштаб по оси Y, и характеристика приобретает вид, показанный на рис. 2.5.

По входной характеристике графоаналитическим способом определяем базовый ток транзистора в схеме усилительного каскада ОЭ. Для этого,

оставаясь в диалоге с программой графического отображения результатов расчета *Probe*, делаем следующее.

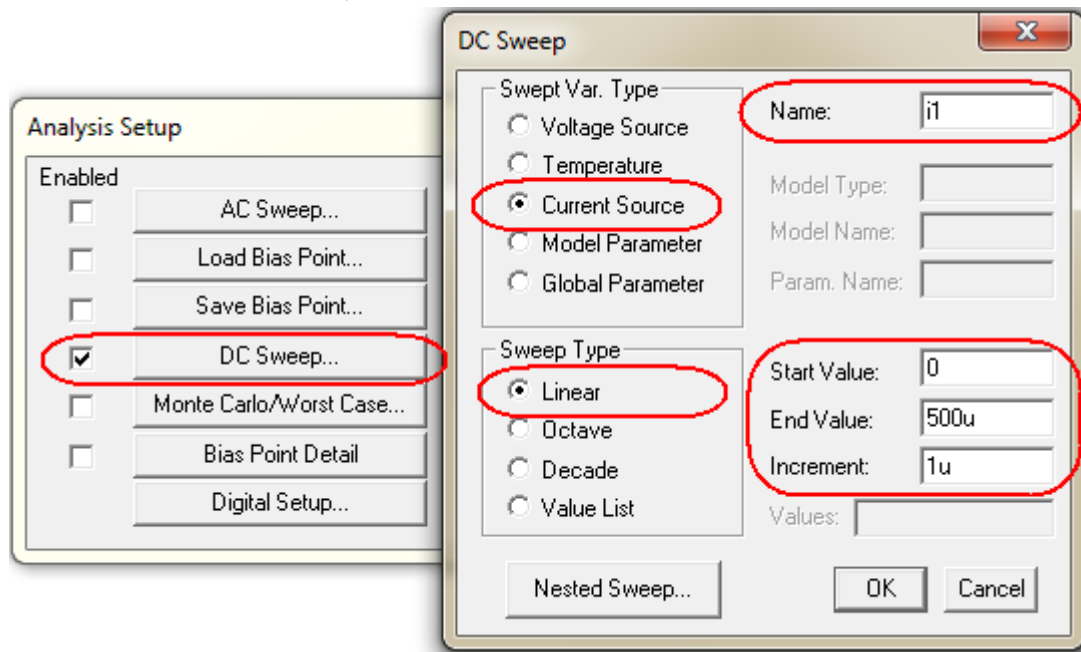



Рис. 2.4. Задание на построение входной характеристики транзистора КТ315В

Наносим (пиктограмма ) на график линию нагрузки  $U_{\text{оэ}}(I_{\text{б}}) = E_{\text{см}} - I_{\text{б}}R_{\text{см}} - I_{\text{з}}R_{\text{з}}$ , записав в окне *Trace Expression* следующее выражение:

$$E_{\text{см}} - IB(VT) R_{\text{см}} - (IB(VT) + IC(VT)) R_{\text{з}},$$

где  $E_{\text{см}} = E_n \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 2,1\text{В}$ ,  $R_{\text{см}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 1580 \text{ Ом}$  и  $R_{\text{з}} = R_4 + R_5 = 50 \text{ Ом}$ ,

определяемые через параметры элементов схемы (рис. 2.1). Полученное уравнение линии нагрузки отображено на рис. 2.5.

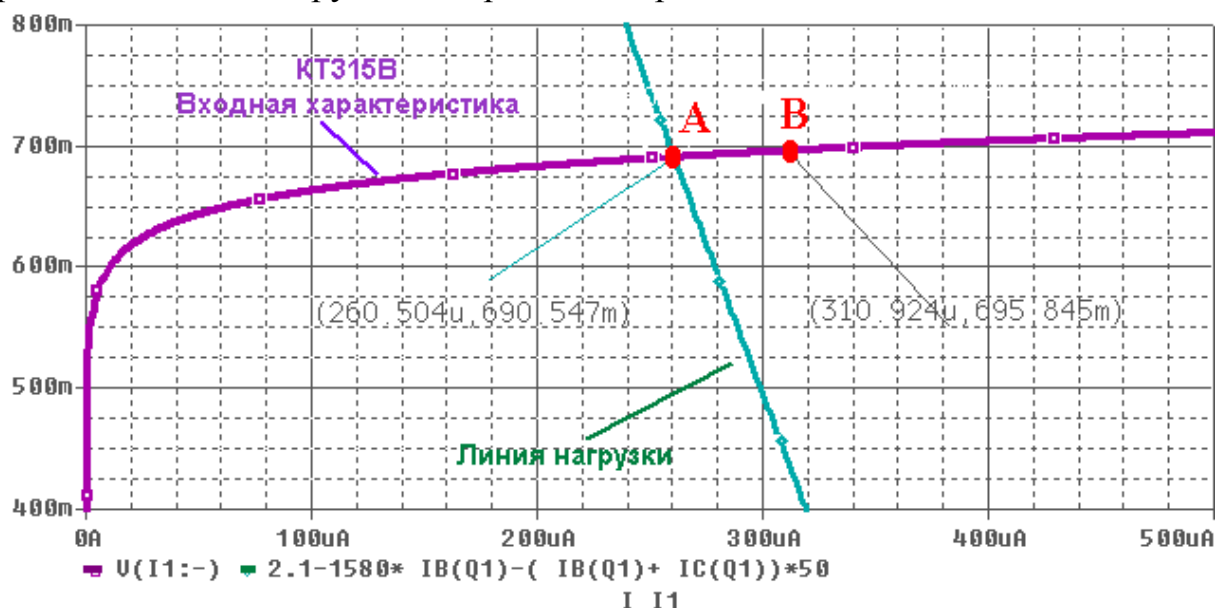



Рис. 2.5. Входная характеристика транзистора



По координатам точки пересечения линии нагрузки и входной характеристики транзистора (т. А) с помощью курсора определяем базовый ток  $I_6$  (260 мкА) и напряжение база-эмиттер  $U_{6э}$  (690 мВ). На линейном участке характеристики выбираем вторую точку (т. В) и определяем входное сопротивление транзистора  $r_{вх}$  в режиме малого сигнала:

$$r_{вх} = h_{11э} = \frac{\Delta U_{6э}}{\Delta I_6} = \frac{696 - 690}{310 - 260} = \frac{6 \text{ мВ}}{50 \text{ мкА}} = 120 \text{ Ом}.$$

Для расчета семейства выходных характеристик биполярного транзистора  $I_K(U_{кэ})$  необходимо задать режим расчета тока  $I_K$  при изменении напряжения  $U_{кэ}$  при фиксированных значениях тока базы  $I_6$ . Для этого устанавливаем маркер тока  на коллектор транзистора для задания вывода тока  $I_K$ , а маркер вывода напряжения  $U_{6э}$  удаляем, и устанавливаем режим расчета выходной характеристики **DC Sweep...** (рис. 2.6).

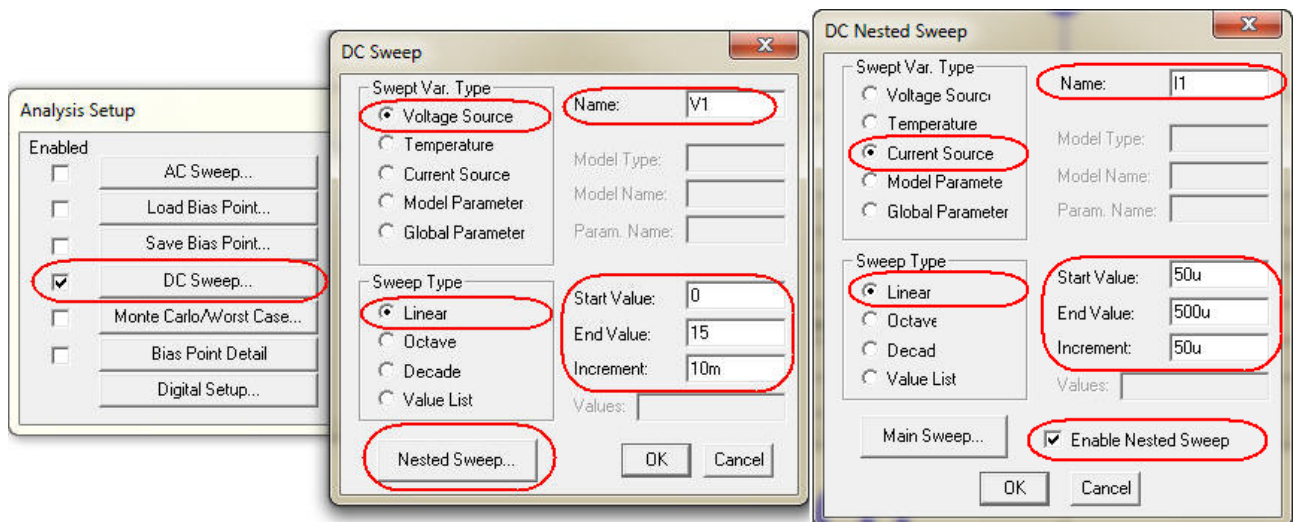



Рис. 2.6. Задание на построение семейства выходных характеристик транзистора

Запускаем схему на расчет и получаем семейство выходных характеристик (рис. 2.7). По выходной характеристике графоаналитическим способом определяем коллекторный ток транзистора в схеме усилительного каскада ОЭ. Для этого наносим на график линию нагрузки  $U_{кэ}(I_K) = E_n - I_K R_K - I_9 R_9$ , записав в командной строке окна *Trace Expression* (пиктограмма ) выражение  $(E_n - V(V1))/R_9$ , где  $E_n = 10 \text{ В}$  и

$R_{\Sigma} = R_3 + R_4 + R_5 = 250 \text{ Ом}$  определяются через параметры элементов схемы. Полученное уравнение линии нагрузки отображено на рис 2.7. Построив (используя линейную интерполяцию) фрагмент дополнительной выходной характеристики, соответствующей току  $I_6=260\text{мкА}$ , определяем координаты точки пересечения линии нагрузки и этой выходной характеристики (точка А).

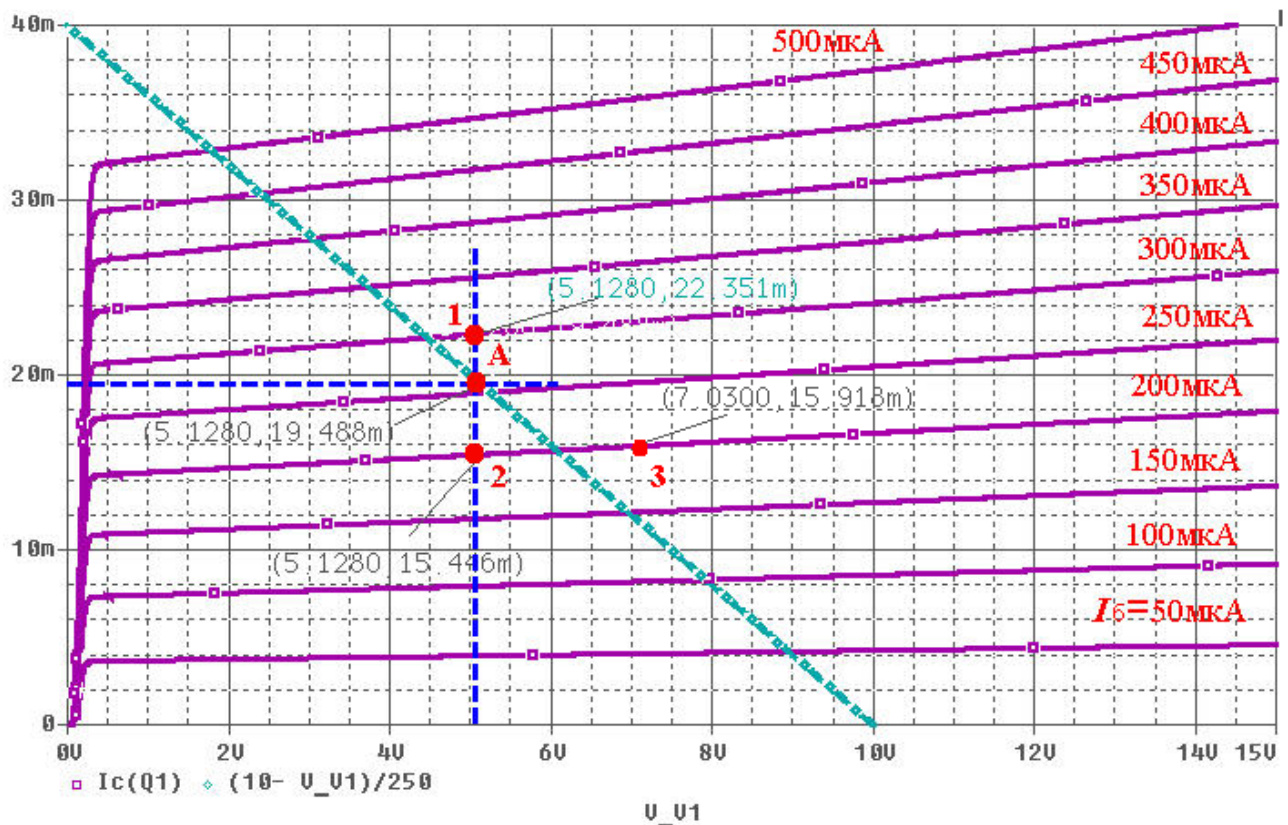


Рис. 2.7. Семейство выходных характеристик транзистора

С помощью курсоров определяем координаты точек 1 и 2, для которых  $U_{кэ1}=U_{кэ2}=U_{кэА}$ , и рассчитываем коэффициент усиления транзистора для малого сигнала.

$$h_{21Э} = \frac{\Delta I_{\kappa}}{\Delta I_6} = \frac{22.351\text{мА} - 15.446\text{мА}}{300\text{мкА} - 200\text{мкА}} = 69.$$

Для определения выходного сопротивления транзистора на выходных характеристиках с помощью курсоров определяем координаты точки 3. По полученным данным рассчитываем выходное сопротивление транзистора.

$$r_{\text{вых}} = \frac{1}{h_{223}} = \frac{U_{\text{к3}} - U_{\text{к2}}}{I_{\text{к3}} - I_{\text{к2}}} = \frac{(7.03 - 5.128)\text{В}}{(15.918 - 15.446)\text{мА}} = 4,03\text{кОм}.$$

Для определения рабочего режима усилителя на биполярном транзисторе с общим эмиттером собираем рабочую схему (рис. 2.8) и устанавливаем режим **Bias Point Detail**. После запуска программы расчета **PSpice (F11)** и активации пиктограмм **V** и **I**, экран приобретает вид, показанный на рис. 2.8.

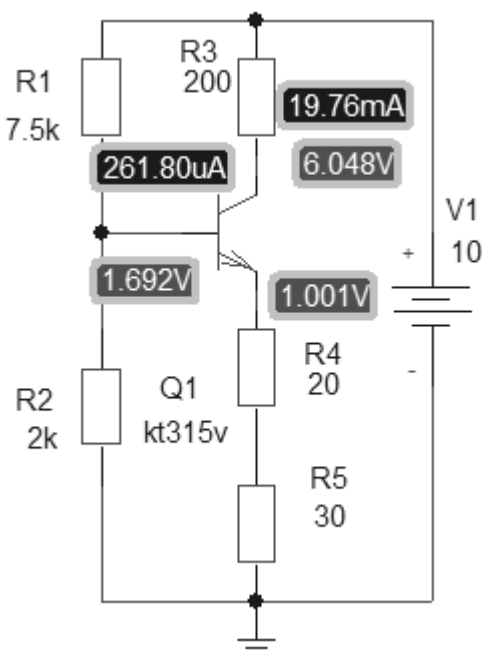


Рис. 2.8. Схема усилителя для расчета режима

Результаты расчета каскада по постоянному току можно посмотреть также в выходном файле программы **Pspice**, воспользовавшись, например, командой **Analysis/Examine Output** программы **Schematics**:

\*\*\*\* BIPOLAR JUNCTION TRANSISTORS

NAME	Q_Q1
MODEL	kt315v
IB	2.62E-04
IC	1.98E-02
VBE	6.91E-01
VBC	-4.36E+00
VCE	5.05E+00
RPI	1.04E+02 – входное сопротивление
RO	3.12E+03 – выходное сопротивление
BETAAC	6.83E+01 – коэффициент $h_{213}$

Результаты аналитического, графического расчета и моделирования схемы сведены в таблицу.

	$I_{\text{к}}, \text{мА}$	$I_{\text{б}}, \text{мкА}$	$U_{\text{кэ}}, \text{В}$	$U_{\text{бэ}}, \text{мВ}$
Аналитический	19,6	261	5,09	700
Графический	19,5	260	5,13	690
Моделирование схемы	19,8	262	5,05	691

## 2.2. Расчет основных параметров усилительного каскада

*Аналитический расчет параметров.* К основным параметрам усилительных каскадов относятся: коэффициент усиления напряжения, входное сопротивление каскада и выходное сопротивление каскада, которые можно рассчитать, через  $h$ -параметры малосигнальной схемы замещения транзистора (см. рис. 2.1):

$$K_e = \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{e_{\Gamma}} = K_{u\text{XX}} \xi_{\text{ВХ}} \xi_{\text{ВЫХ}} = - \frac{h_{21\text{э}} [R_3 \parallel (1/h_{22\text{э}})]}{h_{11\text{э}} + (h_{21\text{э}} + 1)R_4} \cdot \frac{R_{\text{ВХ}}}{R_{\text{ВХ}} + R_{\Gamma}} \cdot \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{ВЫХ}} + R_{\text{Н}}},$$

$$R_{\text{ВХ}} = [h_{11\text{э}} + (h_{21\text{э}} + 1)R_4] \parallel R_{\text{СМ}},$$

$$R_{\text{ВЫХ}} = R_3 \parallel (1/h_{22\text{э}}).$$

В этих формулах  $R_{\text{СМ}} = R_1 \parallel R_2$ ,  $R_{\text{Н}}$  – сопротивление нагрузки.

$h$ -параметры можно приблизительно определить через рабочий ток транзистора  $I_{\text{К}}$  и коэффициент усиления  $\beta$  следующим образом:

$$h_{11\text{э}} \approx \beta \frac{\Phi_{\text{Т}}}{I_{\text{К}}}, \quad h_{21\text{э}} = \beta, \quad r_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{h_{22\text{э}}} \approx \infty.$$

Здесь  $\Phi_{\text{Т}}$  – тепловой потенциал, который для комнатной температуры  $+20^\circ\text{C}$  примерно равен 25 мВ. С учетом найденных ранее при анализе по постоянному току значений этих параметров, получаем:  $K_e = -6,67$ ,  $R_{\text{ВХ}} = 774 \text{ Ом}$ ,  $R_{\text{ВЫХ}} = 190 \text{ Ом}$ .

Проведем *расчет основных параметров каскада с помощью программы моделирования*. С этой целью схему (рис. 2.8) дополним элементами: разделительными конденсаторами  $C_1$  и  $C_2$ , блокирующим конденсатором  $C_3$ , конденсатором  $C_4$  – имитацией емкости нагрузки, внутренним сопротивлением генератора входного сигнала  $R_6$ , сопротивлением нагрузки  $R_7$ , генератором синусоидального сигнала  $V_2$  (VSIN) и элементом глобальных параметров PARAMETERS. Схема преобразуется к виду, показанному на рис. 2.9.

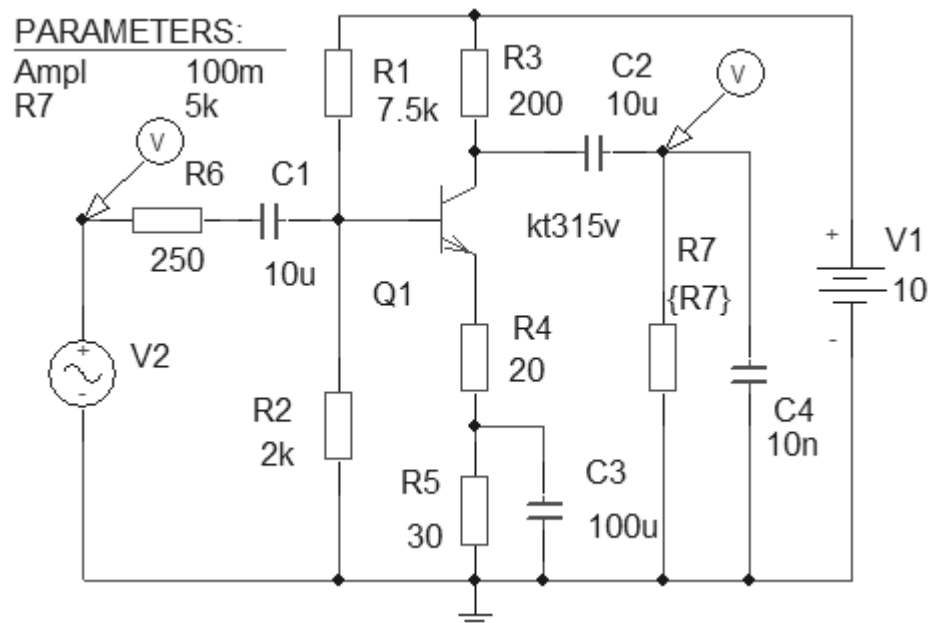


Рис. 2.9. Схема для моделирования каскада ОЭ

Прежде, чем проводить моделирование, необходимо задать параметры вновь введенных элементов. Обратите внимание, что сопротивление резистора  $R_7$  нужно ввести как глобальный параметр –  $\{R_7\}$  (Фигурные скобки обязательны).

Для источника входного сигнала  $V_2$  устанавливаем параметры, как показано на рис. 2.10. Обратите внимание, что амплитуда входного сигнала также введена как глобальный параметр –  $\{ampl\}$ .

В окне элемента глобальных параметров PARAM задаем имена параметров и их величины (рис. 2.11).

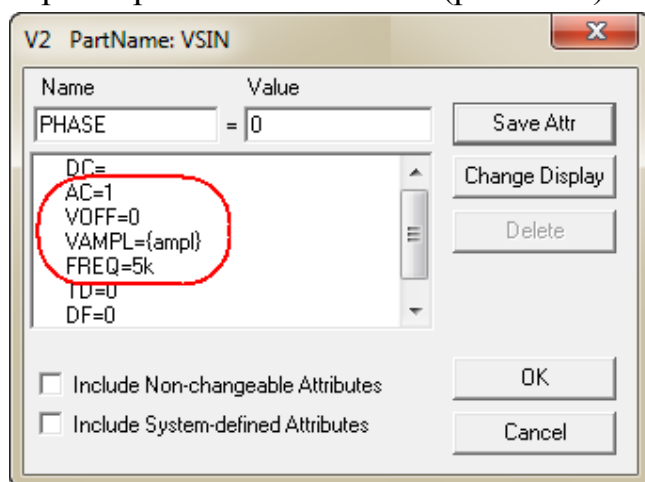


Рис. 2.10. Установки для источника входного сигнала

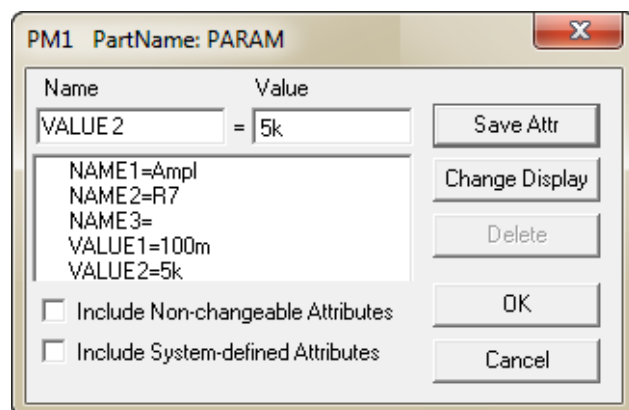

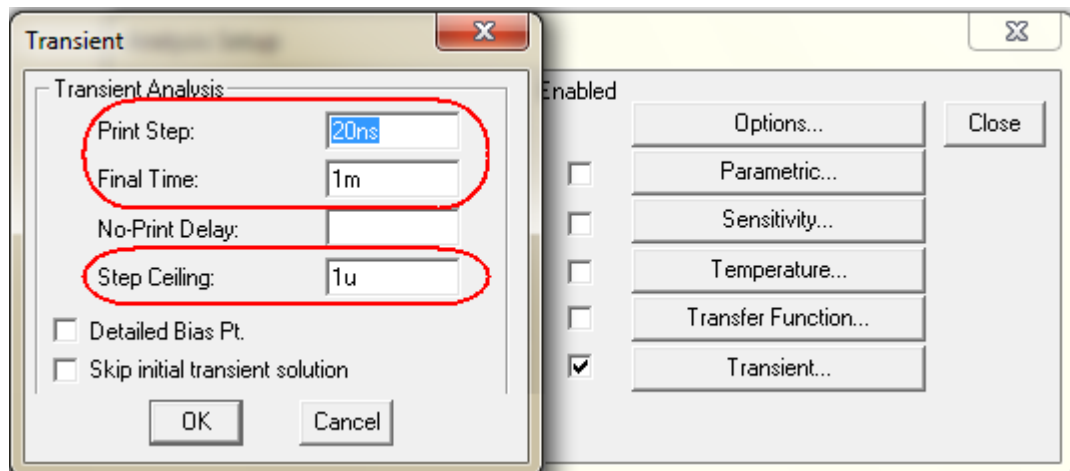



Рис. 2.11. Установки глобальных параметров

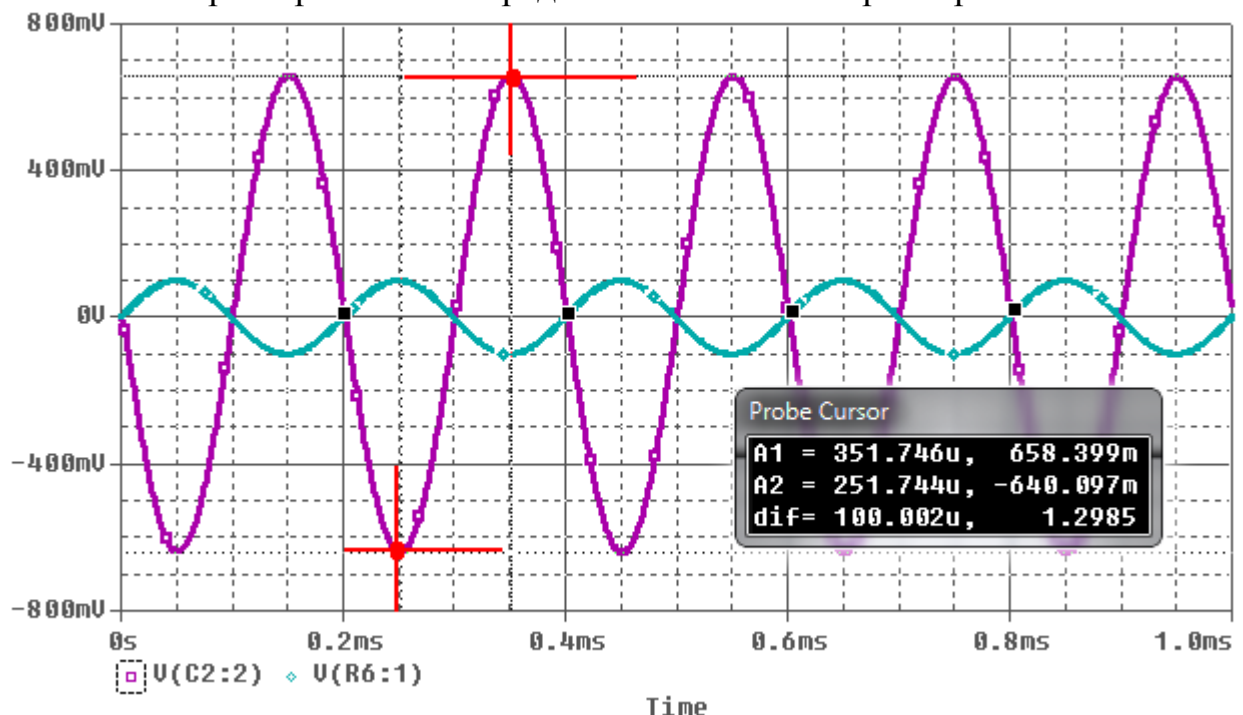
Прежде всего, проверяем работоспособность усилителя. Для этого устанавливаем режим расчета схемы во временной области *Analysis – Setup* –

*Transient...* (рис. 2.12) и для вывода осциллограмм напряжения устанавливаем на входе и выходе схемы маркеры  (рис. 2.9).



**Рис. 2.12. Установки для временного анализа**


Затем запускаем программу расчета *PSpice* (*F11* или пиктограмма ) и получаем осциллограммы (рис. 2.13). Обратите внимание на то, что выходной сигнал не должна быть искажённым. С помощью электронных курсоров определяем размах выходного сигнала:  $\Delta U_{\text{ВЫХ}} = 1,2985 \text{ В}$ . Считаем коэффициент усиления усилителя:  $K_u = \frac{1,2985}{0,2} = 6,49$ , что примерно совпадает с ручным расчетом (6,67). Теперь, убедившись, что усилитель работает, можно снимать его характеристики и определять остальные параметры.

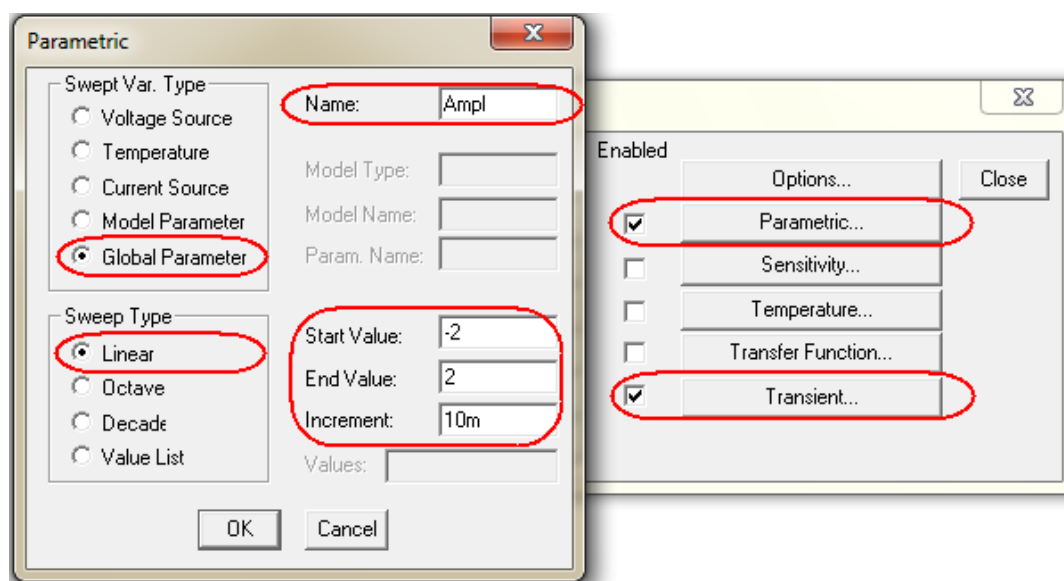


**Рис. 2.13. Осциллограммы входного и выходного напряжений**





Для построения амплитудной характеристики необходимо снять семейство выходных сигналов при разной амплитуде входного. Для этого, увеличивая амплитуду входного сигнала, наблюдать и фиксировать амплитуду и форму выходного сигнала. При этом важно, чтобы были появились нелинейные искажения в выходном сигнале.

Для автоматизации процесса расчета удобно воспользоваться глобальным параметром *Ampl* . С этой целью по команде *Analysis – Setup* или с помощью пиктограммы  надо установить режим *PARAMETRIC* (рис. 2.14).



**Рис. 2.14. Установки для параметрического анализа**

Затем провести расчет схемы и получить набор графиков выходного сигнала. Если искажений в выходном сигнале нет, необходимо увеличивать значения *Start Value* и *End Value* (и *Increment*) до тех пор, пока искажения не появятся (рис. 2.15, а).

Затем, находясь в интерфейсном окне программы **PROBE**, по команде **Plot - X Axis Settings... – Performance Analysis** (или пиктограмма ) на экране **Probe** получаем заготовку графика, у которого по оси *X* откладывается глобальный параметр *Ampl* (рис. 2.15,б) с предельными значениями, указанными в режиме *PARAMETRIC* (рис. 2.14). В том же интерфейсном окне программы **PROBE**, по команде **Trace – Add...** (или с помощью пиктограммы ) входим в окно целевых функций (рис. 2.16).

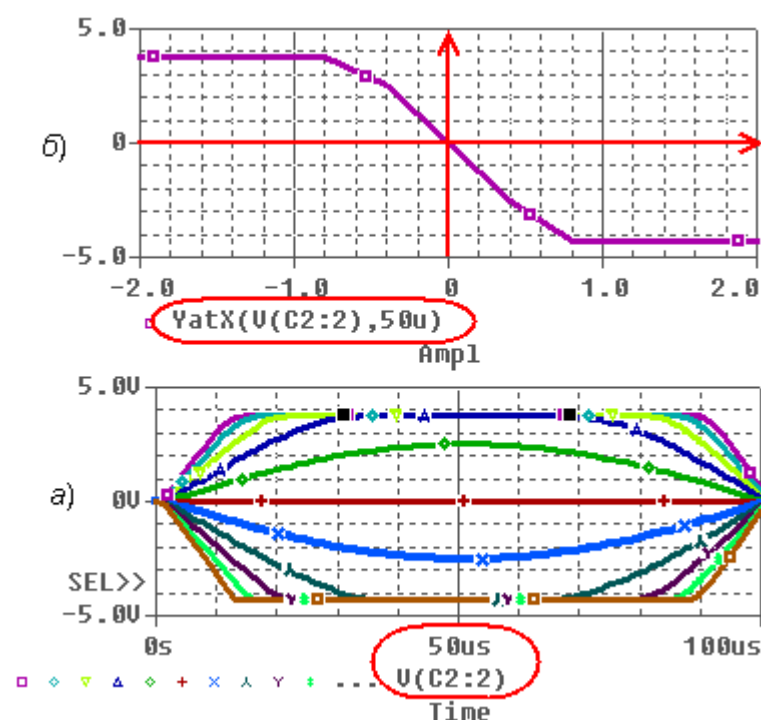



Рис. 2.15. Диаграммы выходного напряжения (а) и амплитудная характеристика (б)

Здесь выбираем функцию  $YatX(1, X\_value)$ , которая определяет значение переменной в заданной точке. В качестве переменной выбираем выходное напряжение. На рис. 2.15,а эта переменная обозначена как  $V(C2:2)$ . В момент, когда выходное напряжение достигает предельных значений, определяем заданную точку. Это – 50 мкс (50u).

По амплитудной характеристике (рис. 2.15,б) определяем максимальную амплитуду неискаженного выходного напряжения ( $U_{\text{вых макс}} = 3,5\text{В}$ ) и динамический диапазон входного сигнала ( $U_{\text{вх макс}} = 0,6\text{В}$ ). По наклону линейного участка характеристики находим коэффициент усиления ( $K_u=6,32$ ).

Для получения амплитудно-частотной характеристики усилителя и определения полосы пропускания ( $f_n \dots f_v$ ) необходимо в режиме *Analysis – Setup* (или иконка ) отключить режим *TRANSIENT* и *PARAMETRIC* и установить режим анализа по переменному току *AC Sweep* (рис. 2.17).

Затем к выходу схемы подключить специальный маркер для измерения коэффициента передачи в децибелах (*Markers – Mark Advanced – Vdb*). В этом случае выходной сигнал будет измеряться в децибелах:  $U(\text{дБ}) = 20\lg(U)$ . А так



как напряжение источника сигнала в этом режиме равно  $E_r=1\text{В}$  (см. рис. 2.10), то коэффициент усиления будет численно равен выходному напряжению в дБ.

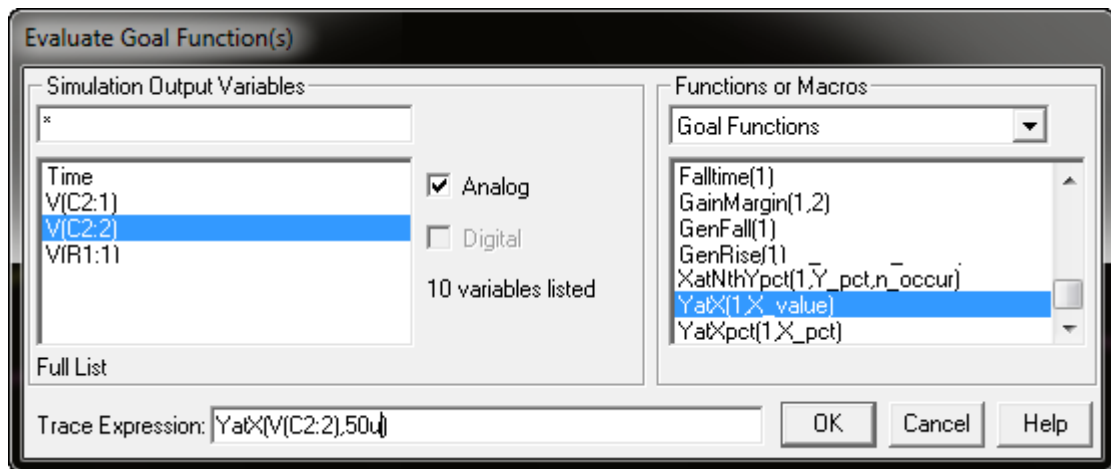


Рис. 2.16. Установки для построения амплитудной характеристики

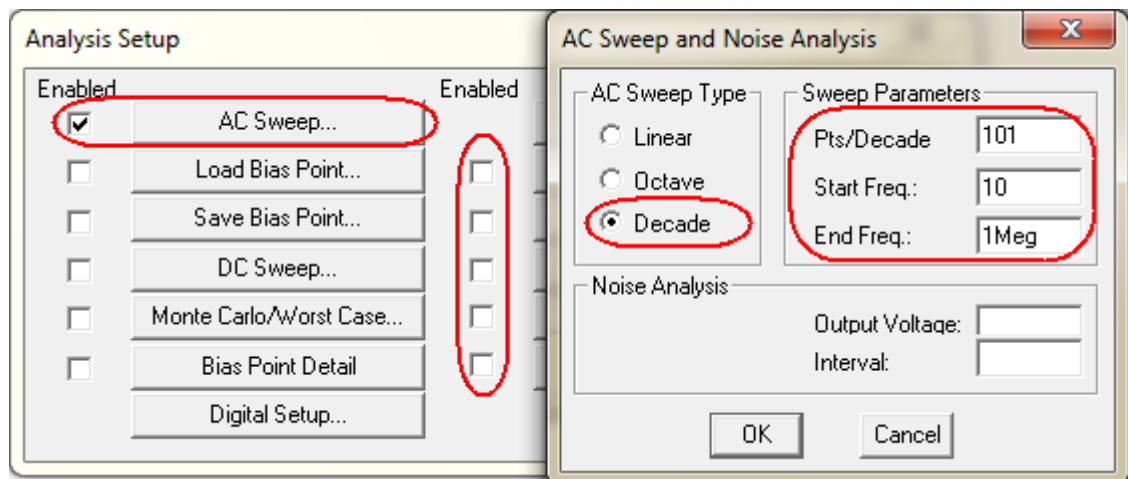


Рис. 2.17. Установки частотного анализа

Запускаем схему на расчет и получаем амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) усилителя (рис. 2.18).

С помощью электронных курсоров определяем коэффициент усиления в области средних частот:  $f = 3\text{ кГц}$ ,  $LK_u = 16,3\text{ дБ}$ ,  $K_u = 6,5$ . Затем на уровне, где коэффициент усиления равен  $LK_u = 16,3 - 3 = 13,3\text{ дБ}$ , определяем граничные частоты:  $f_H = 96\text{ ГГц}$ ,  $f_B = 83,4\text{ кГц}$ .

*Нагрузочная характеристика* определяет зависимость коэффициента усиления усилителя от сопротивления нагрузки  $K_u(R_H)$ . По этой характеристике можно определить выходное сопротивление усилителя.

Расчет этой характеристики можно автоматизировать, воспользовавшись глобальным параметром  $\{R7\}$  (см. рис. 2.11).

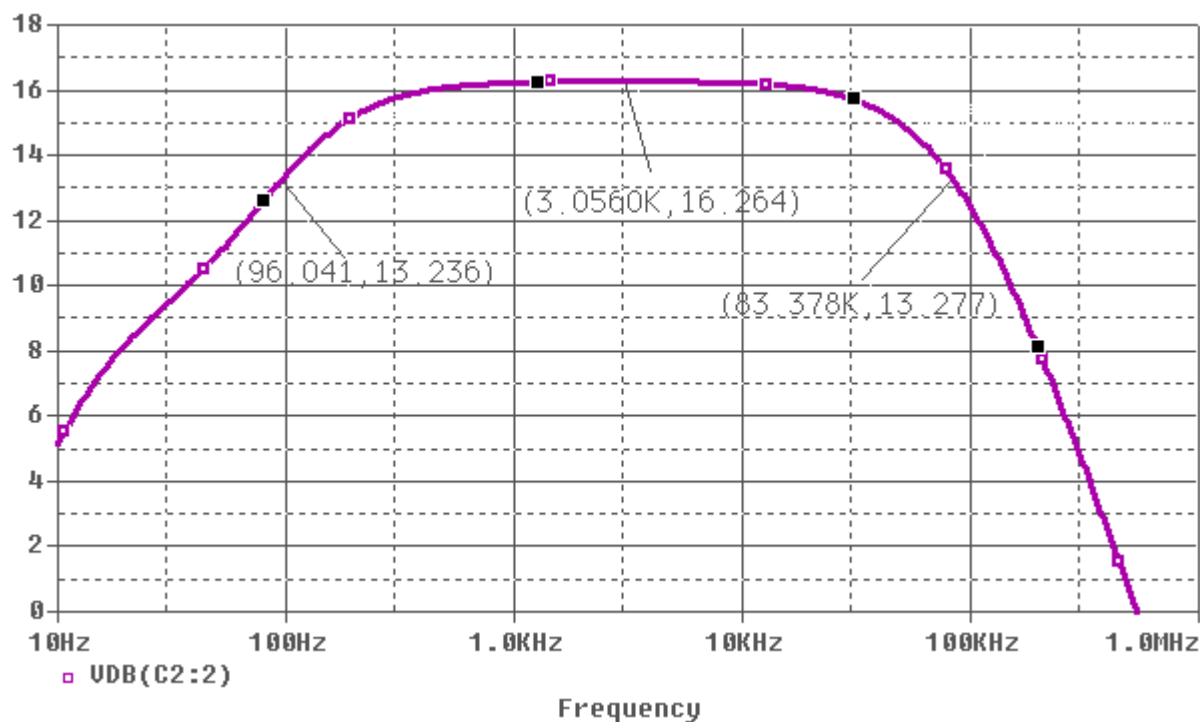






Рис. 2.18. Амплитудно-частотная характеристика усилительного каскада ОЭ

Для этого отключаем специальный маркер для измерения выходного напряжения в децибелах и заменяем его маркером , измеряющим это напряжение в Вольтах. Тогда коэффициент усиления будет определяться в относительных единицах.

Затем в режиме установки параметров анализа (*Analysis – Setup* или пиктограмма ) входим в режим *PARAMETRIC* и устанавливаем параметры многовариантного анализа (рис. 2.19).

Запускаем схему на расчет и получаем семейство амплитудно-частотных характеристик усилителя (рис. 2.20,а).

Затем, находясь в интерфейсном окне программы **PROBE**, по команде *Plot - X Axis Settings... – Performance Analysis* (или пиктограмма ) на экране **Probe** получаем заготовку графика, у которого по оси *X* откладывается глобальный параметр *R7* (рис. 2.20,б) с предельными значениями, указанными в режиме *PARAMETRIC* (рис. 2.19). В том же интерфейсном окне программы **PROBE**, по команде *Trace – Add...* (или с помощью пиктограммы ) входим в окно целевых функций (рис. 2.21).

Здесь выбираем функцию  $YatX(1, X\_value)$ , которая определяет значение переменной в заданной точке. В качестве переменной выбираем выходное напряжение. На рис. 2.20,а эта переменная обозначена как V(C2:2). Заданную точку (3 кГц) определим внутри полосы пропускания.

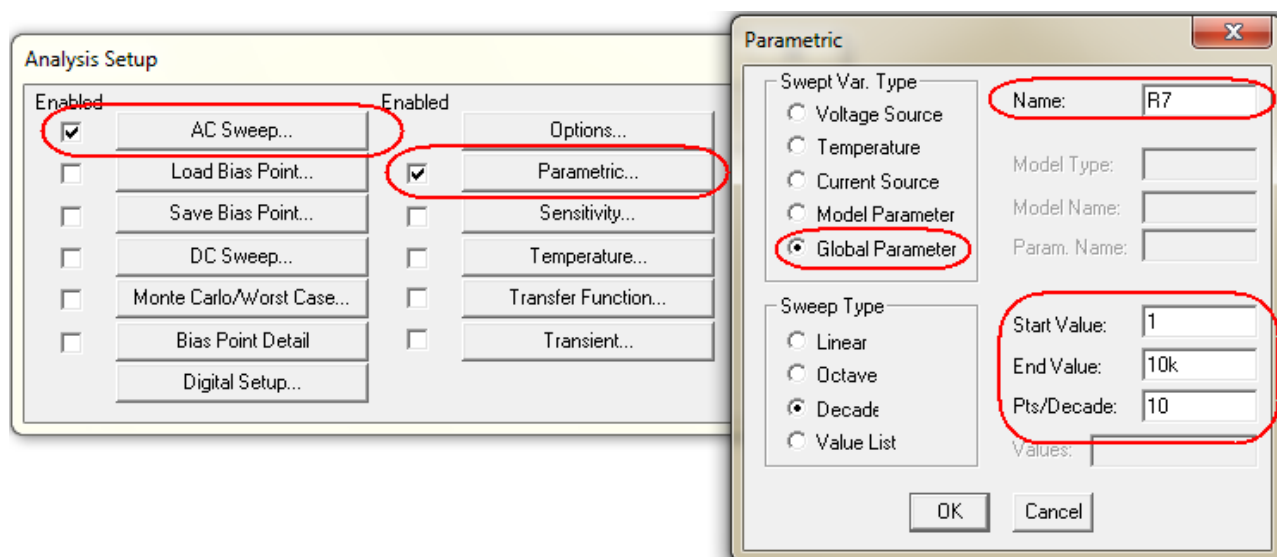


Рис. 2.19. Установки для параметрического анализа

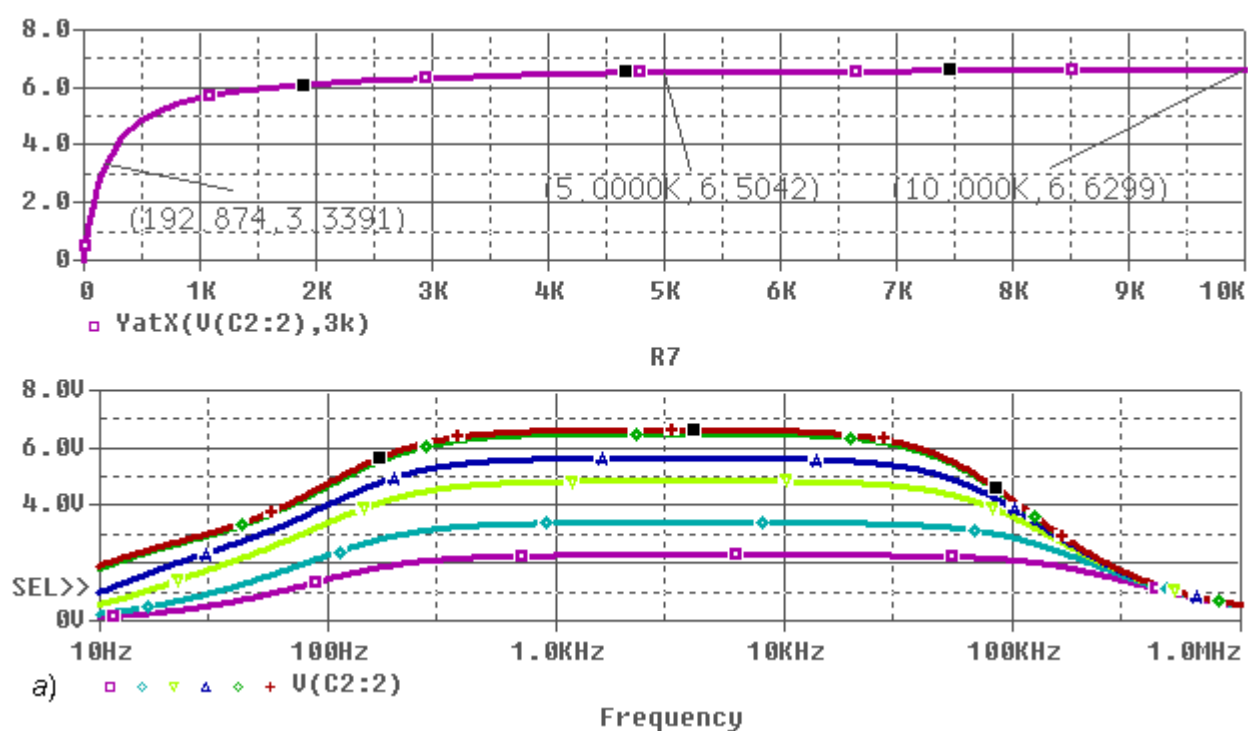
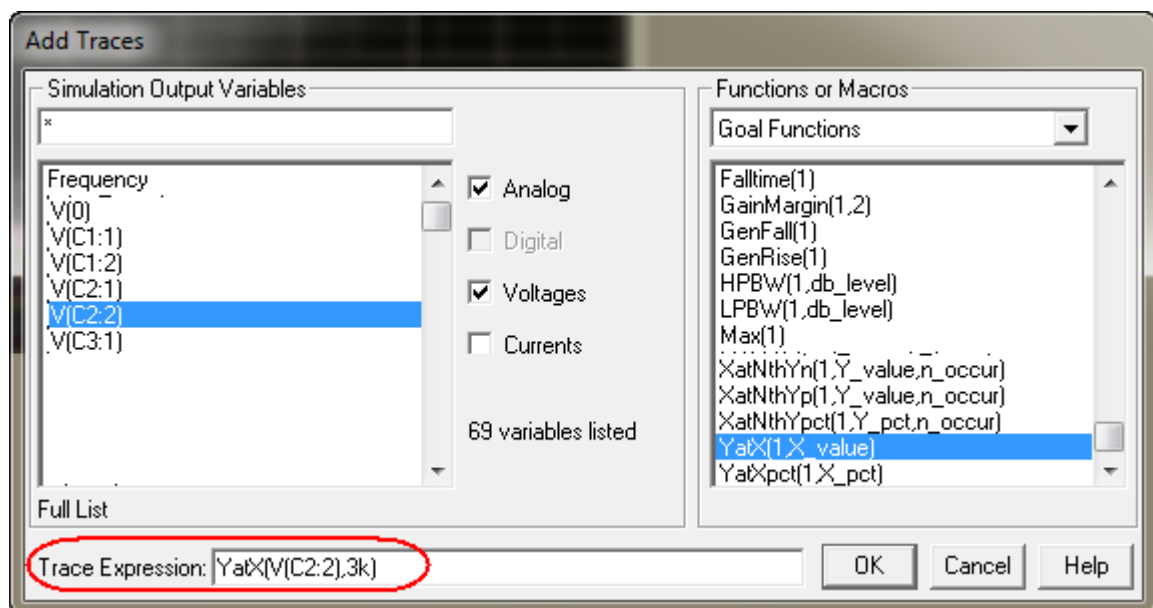


Рис. 2.20. Семейство АЧХ (а) и нагрузочная характеристика усилителя (б)



**Рис. 2.21. Установки для построения нагрузочной характеристики**

По нагрузочной характеристике определяем выходное сопротивление каскада. Определить выходное сопротивление усилителя можно из графика  $K_u(R_H)$  по уровню  $0,5U_{\text{ВЫХ XX}}$ . Так, при  $R_H=10\text{кОм}$  (почти холостой ход)  $K_u= 6,63$ , тогда для  $K_u= 3,27$  находим  $R_{\text{ВЫХ}} = 185 \text{ Ом}$ . Выходное сопротивление можно также найти из соотношения  $R_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_{H1}R_{H2}(U_{\text{ВЫХ2}} - U_{\text{ВЫХ1}})}{U_{\text{ВЫХ1}}R_{H2} - U_{\text{ВЫХ2}}R_{H1}}$ . Расчет по формуле для  $R_{H1} = 5\text{кОм}$  и  $R_{H2}=185 \text{ Ом}$  дает  $R_{\text{ВЫХ}}= 197 \text{ Ом}$ .

### 3. ЭЛЕКТРОННЫЙ КЛЮЧ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ.

Для управления силовыми элементами обычно применяют электронные ключи, которые строят либо на транзисторах, либо на интегральных схемах. Следующий пример демонстрирует применение электронного ключа на биполярном транзисторе для управления электромагнитным реле.

**Задача 3.** Разработать схему (рис. 3.1) управления реле РЭС-15 (паспорт РС4.591.003), управляемую устройством, построенной на цифровых интегральных схемах 155 серии. Проверить ее работоспособность и исследовать ее характеристики методом моделирования в среде программы Design Lab 8.0.

В справочнике находим паспортные данные реле РС4.591.003: сопротивление обмотки 280-380 Ом, ток срабатывания 21 мА, ток отпускания 5 мА, рабочий ток 27-33 мА.

Расчет схемы управления (рис.3.1) сводится к выбору транзистора и диода, а также к расчету входной цепи. При расчете будем учитывать наихудшее сочетание всех параметров. Так для реле примем минимальное сопротивление обмотки (280 Ом) и максимальный рабочий ток (33 мА). Для входного напряжения наихудшие значения определяются параметрами микросхемы серии 155:  $U_{\text{вых мин}}^1 = 2,4 \text{ В}$ ,  $U_{\text{вых макс}}^0 = 0,4 \text{ В}$ . Выбираем транзистор КТ315В. Для этого транзистора предельно допустимые параметры равны:  $I_{\text{к доп}} = 100 \text{ мА}$ ,  $U_{\text{кз доп}} = 20 \text{ В}$ ,  $\beta_{\text{мин}} = 20$ .

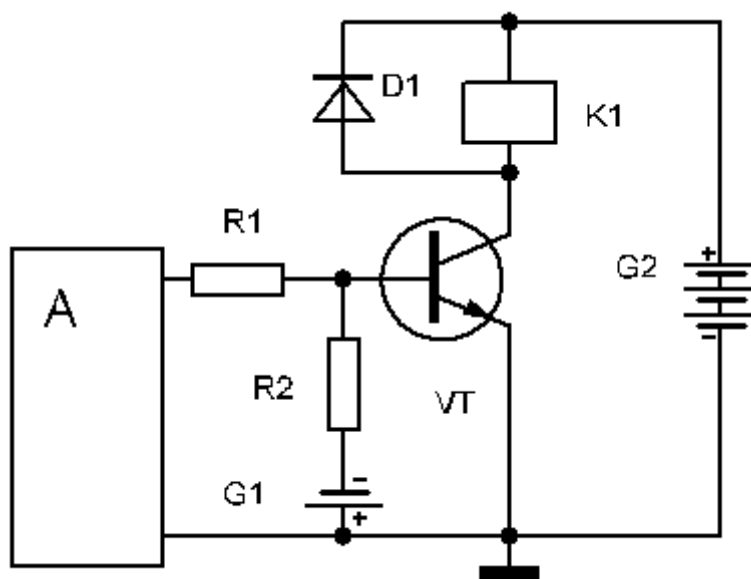


Рис. 3.1 Схема управления реле РЭС-15

Рассчитываем напряжение источника питания для обеспечения работоспособности схемы.

$$E_{\text{пит}} > I_{\text{кн}} \cdot R_{\text{к}} + U_{\text{кэн}} = 0,033 \cdot 280 + 0,2 = 9,44 \text{ В.}$$

Из номинального ряда выбираем  $E_{\text{пит}}=10 \text{ В}$ , а напряжение источника смещения выбираем  $E_{\text{см}}=1,5 \text{ В}$ .

При низком входном напряжении ( $U_{\text{вх макс}}^0 = 0,4 \text{ В}$ ) транзистор должен находиться в режиме отсечки, и реле выключается. Режим отсечки транзистора определяется уравнением

$$\frac{U_{\text{вх макс}}^0 R_2 - E_{\text{см}} R_1}{R_1 + R_2} \leq U_{\text{бo}}. \quad (3.1)$$

Условие (3.1) выполняется при любых сочетаниях  $R_1$  и  $R_2$  (и даже при  $E_{\text{см}}=0$ ), так как  $U_{\text{бo}}$  для транзистора КТ315В примерно равно 0,4...0,5В. Поэтому выберем  $R_2=1\text{кОм}$  для более быстрого рассасывания избыточного заряда на этапе выключения транзистора.

Чтобы включить реле, необходимо обеспечить режим насыщения транзистора, то есть должен быть выполнен токовый критерий при минимальном входном напряжении  $U_{\text{вх мин}}^1$ .

$$I_{\text{б}} = I_{\text{R1}} - I_{\text{R2}} \geq \frac{I_{\text{кн}}}{\beta_{\text{мин}}}. \quad (3.2)$$

Раскрывая выражение (3.2) через параметры схемы, получим

$$I_{\text{б}} = \frac{U_{\text{вх мин}}^1 - U_{\text{бн}}}{R_1} - \frac{E_{\text{см}} + U_{\text{бн}}}{R_2} \geq \frac{I_{\text{кн}}}{\beta_{\text{мин}}} = \frac{E_{\text{пит}}}{R_{\text{к}} \beta_{\text{мин}}}.$$

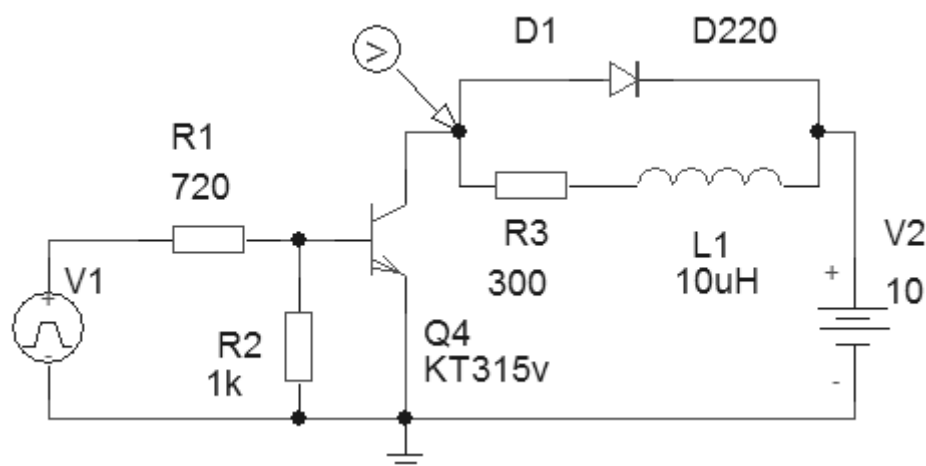
Откуда получаем выражение для расчета сопротивления  $R_1$ .

$$R_1 \leq \frac{U_{\text{вх мин}}^1 - U_{\text{бн}}}{\frac{E_{\text{пит}}}{R_{\text{к}} \beta_{\text{мин}}} + \frac{E_{\text{см}} + U_{\text{бн}}}{R_2}}.$$

С учетом ранее выбранного сопротивления резистора  $R_2=1\text{кОм}$  получаем  $R_1 \leq 430 \text{ Ом}$ . Если отказаться от источника смещения ( $E_{\text{см}}=0$ ), то  $R_1 \leq 720 \text{ Ом}$ .

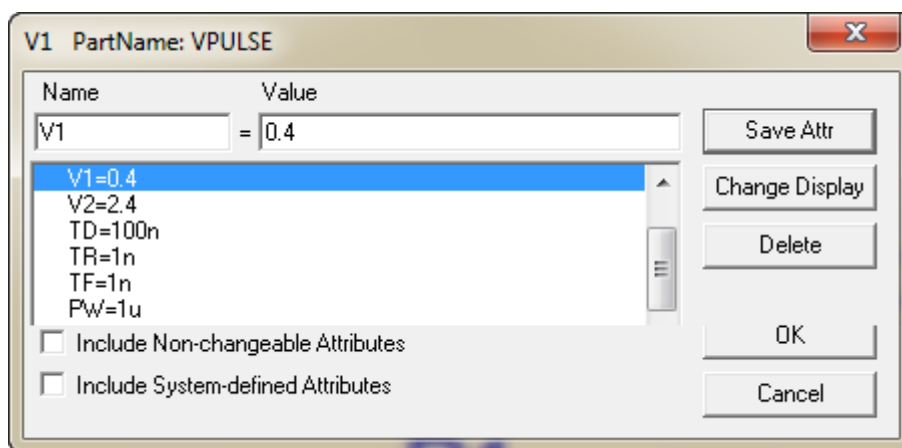
Для ограничения выброса напряжения на коллекторе транзистора при его выключении из-за индуктивных свойств реле в схему включен шунтирующий диод Д220, выдерживающий импульс тока в прямом направлении до 500 мА.

**Схема для моделирования** в программе *Design Lab* показана на рис.3.2. В коллекторную цепь включены резистор  $R_3$  и индуктивность  $L_1$ , моделирующие катушку реле.



**Рис. 3.2.** Схема моделирования в программе *Design Lab*

Источник V1 моделирует управляющее напряжение. Его параметры отражены на рис. 3.3. Время срабатывания реле составляет несколько миллисекунд (механическое срабатывание). Однако в задании длительность входного импульса задана 1мкс, так как нас интересуют переходные процессы в электрической цепи, которые проходят существенно быстрее.



**Рис. 3.3.** Установки для запускающего сигнала V1

Зададим моделирование передаточной характеристики (рис. 3.4) и переходных процессов при включении и выключении данной схемы (рис. 3.5)

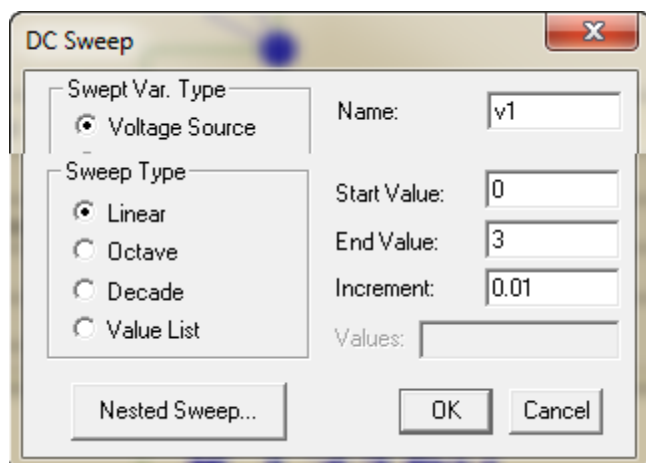


Рис. 3.4. Установки расчета передаточной характеристики

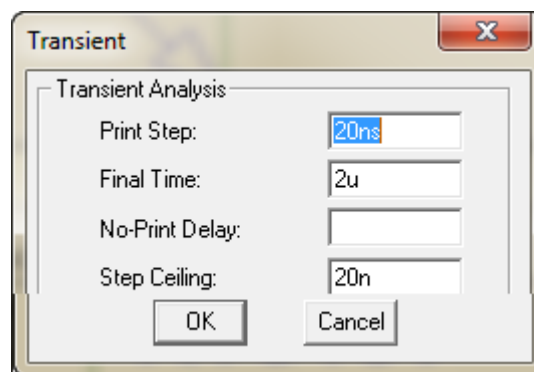


Рис. 3.5. Установки расчета переходного процесса

Результаты расчета передаточной характеристики приведены на рис. 3.6. Анализ характеристики показывает, что при входном напряжении  $U_{\text{вх}}^0 = 0,4$  В транзистор выключен (коллекторный ток, а следовательно и ток через реле равен 0), а при входном напряжении  $U_{\text{вх}}^1 > 2,4$  В транзистор входит в насыщение и через реле проходит максимальный ток равный 33 мА, который обязательно включит реле.

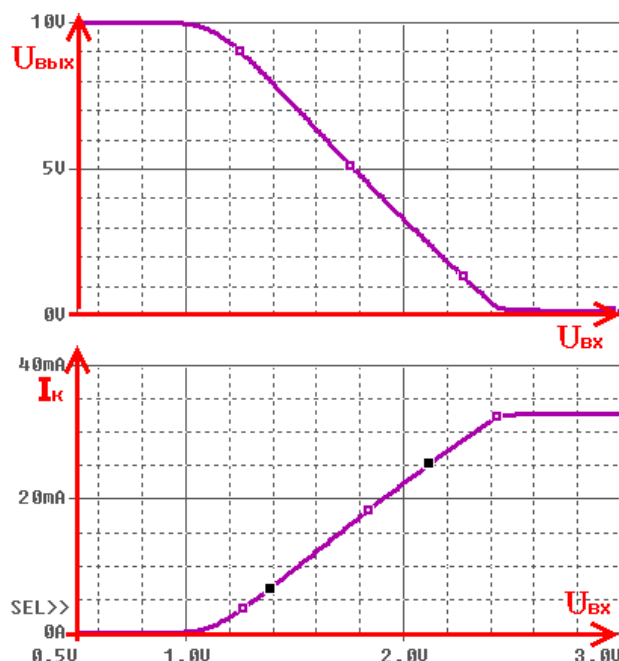
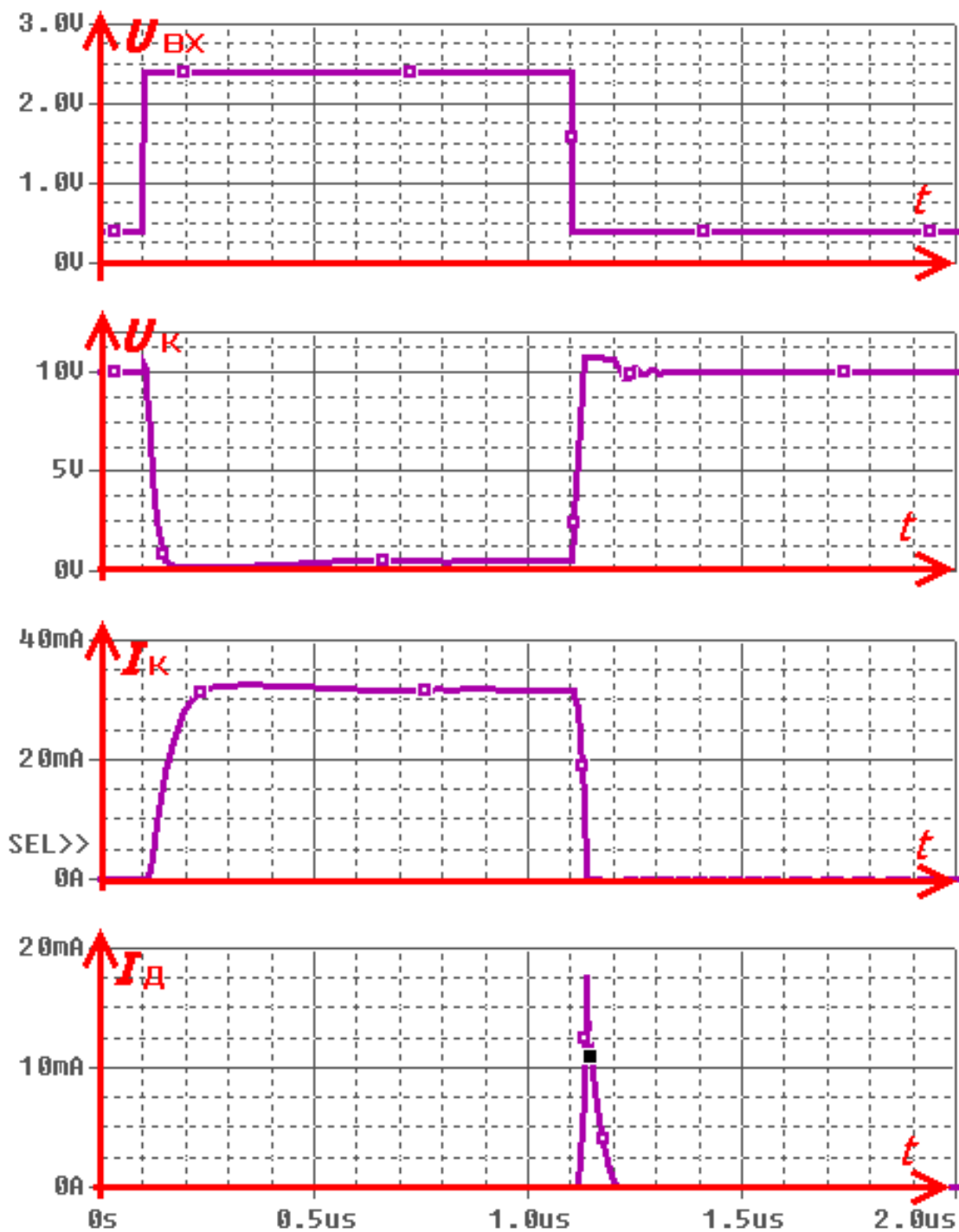


Рис. 3.6. Результаты расчета выходного напряжения и тока коллектора при вариации входного сигнала





**Рис. 3.7. Осциллограммы переходного процесса:**

- а) входной сигнал, б) напряжение на коллекторе, в) коллекторный ток,  
г) ток через диод.

Результаты анализа переходных процессов приведены на рис. 3.7, где показаны осциллограмма напряжения на коллекторе транзистора, осциллограмма коллекторного тока и осциллограмма тока через шунтирующий диод. Анализ осциллограмм показывает, что скачки напряжения на коллекторе

транзистора при его выключении не превышают 1 В. А ток через шунтирующий диод не превосходит 20 мА, что существенно меньше его допустимых значений.

#### 4. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ГЕНЕРАТОРА ОДИНОЧНОГО ПРЯМОУГОЛЬНОГО ИМПУЛЬСА

Формирователь однократного прямоугольного импульса может быть построен на основе схемы одновибратора. Практическая схема такого одновибратора, выполненного на базе ТТЛ инверторов без цепей защиты по входам логических элементов, приведена на рис.4.1.

**Задача 4.** Рассчитать элементы формирователя однократного отрицательного импульса, построенного на логических схемах 155ЛА3 (рис.4.1). Длительность выходного сигнала 100 мкс. Запускающий сигнал отрицательной полярности формируется с выхода ИМС той же серии. Длительность запускающего сигнала не определена.

Схема состоит из двух логических элементов И-НЕ (DD1, DD2), цепи запуска ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$ ) и времязадающей цепи ( $R_3$ ,  $C_2$ ).

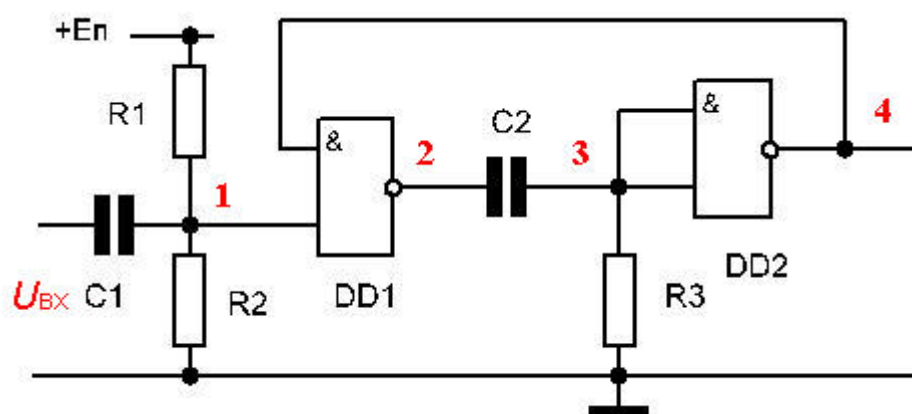


Рис. 4.1. Схема формирователя импульсов

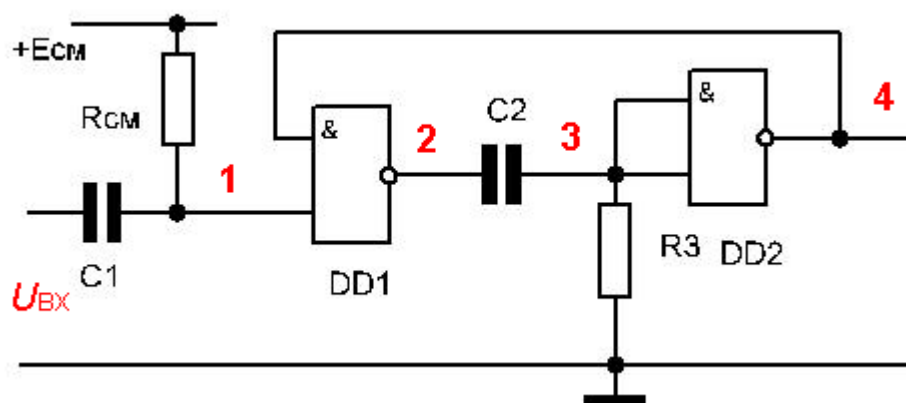


Рис. 4.2 Эквивалентная схема одновибратора

Схема, показанная на рис. 4.2 эквивалентна предыдущей. В ней источник  $E_{см}$  и резистор  $R_{см}$  заменяют источник  $E_{п}$  и делитель  $R_1$ - $R_2$  схемы рис. 4.1. Между параметрами элементов должны выполняться следующие соотношения:

$E_{см} = E_{п} \frac{R_3}{R_2 + R_3}$  и  $R_{см} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$ . Приведенный ниже анализ работы справедлив для той и другой схемы.

На рис.4.3 приведены временные диаграммы работы схемы одновибратора, в предположении, что элементы DD1 и DD2 – идеальные, что справедливо, например, для КМОП интегральных схем.

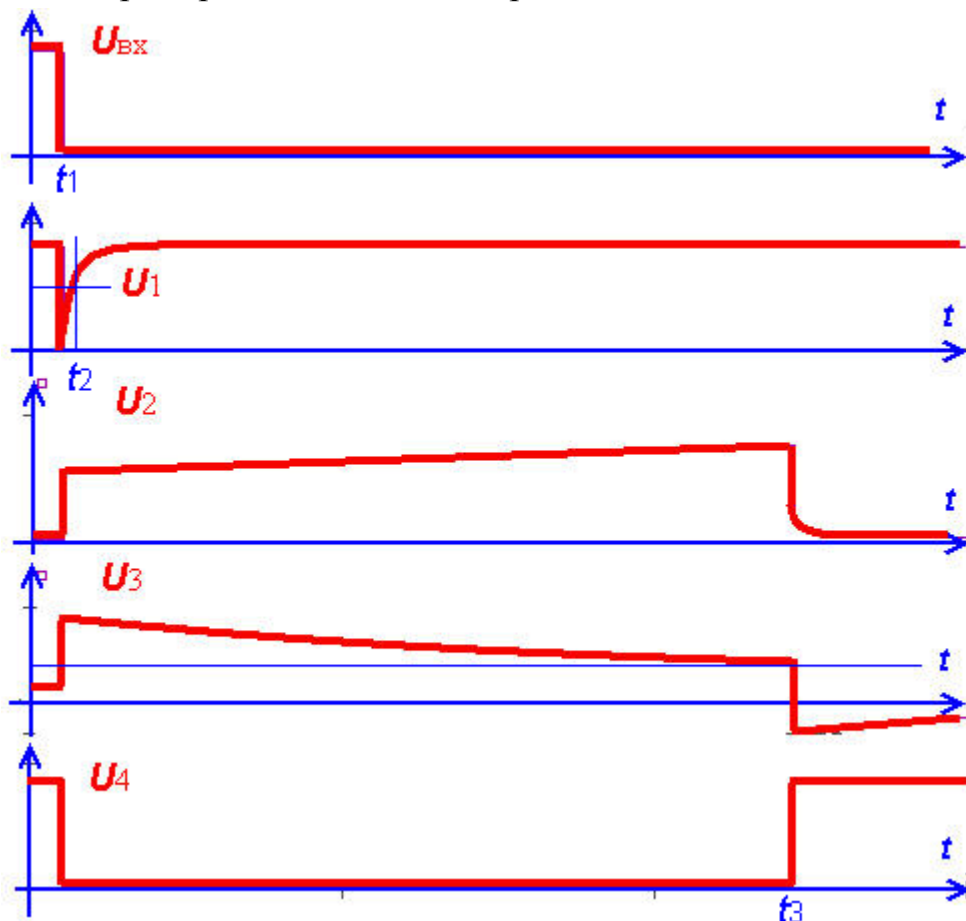


Рис. 4.3. Диаграммы напряжения в схеме одновибратора

В исходном состоянии (до подачи входного импульса) одновибратор имеет состояние устойчивого равновесия: элемент DD1 - открыт ( $U_2 = U^0$ ), а DD2 – закрыт ( $U_4 = U^1$ ). Напряжения в других точках соответственно равны:  $U_{вх} = U^1$ ,  $U_1 = E_{см}$ ,  $U_3 = 0$ . В момент времени  $t = t_1$  на вход подается отрицательный перепад напряжения. Так как напряжение на входе 1 логического элемента DD1 стало ниже  $U_{пер}$ , то элемент DD1 закрывается и напряжение на его выходе

скачком увеличивается от  $U^0$  до  $U^1$ . Это изменение через конденсатор  $C_2$  передается на вход инвертора DD2 (в точку 3). Напряжение на входе DD2 увеличивается до  $U^1$ , и элемент DD2 открывается. Напряжение на его выходе станет равным  $U_{\text{вых}}=U^0$ . За счет положительной обратной связи одновибратор перейдет в состояние квазиустойчивого равновесия, в котором будет находиться строго определенное время. Напряжение  $U_3$  убывает по экспоненте из-за перезаряда конденсатора  $C_2$  с постоянной времени  $\tau_2 = R_3 \cdot C_2$ . Пока напряжение  $U_3 > U_{\text{пер}}$  напряжение на выходе схемы  $U_4$  остается неизменным и равным  $U^0$ . В момент времени  $t=t_3$  напряжение  $U_3$  достигает напряжения переключения, и логический элемент DD2 закрывается. На выходе схемы устанавливается значение  $U^1$ , которое передается на второй вход элемента DD1. Таким образом, элемент DD1 тоже изменяет свое состояние. При этом напряжение  $U_3$  уменьшается скачком на величину  $U^1 - U^0$  и становится равным  $U_3 = U_{\text{пер}} - (U^1 - U^0)$ . Однако защитные диоды (на схеме не показаны) ограничивают этот скачок.

Дифференцирующий конденсатор  $C_1$ , включенный на входе DD1, укорачивает входной сигнал  $U_1$ . Напряжение  $U_1$  увеличивается по экспоненте из-за заряда конденсатора  $C_1$  с постоянной времени  $\tau_1 = R_{\text{см}} \cdot C_1$ . Необходимо, чтобы это напряжение возросло бы до первоначального значения до выхода схемы из квазиустойчивого состояния равновесия. В противном случае при обратном переключении не будет работать положительная обратная связь, что приведет к затягиванию выходного импульса. Поэтому на постоянную времени  $\tau_1$  накладывается ограничение

$$\tau_1 = R_{\text{см}} \cdot C_1 \ll t_{\text{и вых}}. \quad (4.1)$$

В момент, когда заканчивается входной импульс, напряжение на входе 1 логического элемента DD1 тоже скачком меняется. Однако из-за защитных диодов внутри ИМС этот скачок получается небольшим.

*Расчет элементов входной цепи.* Источник  $E_{\text{см}}$  и резистор  $R_{\text{см}}$  обеспечивает закрытое состояние логического элемента DD1 в исходном состоянии. Поэтому  $U_1 = E_{\text{см}} - R_{\text{см}} \cdot I_{\text{вх}}^1 > U_{\text{вх мин}}^1$ . Откуда получаем формулу для выбора сопротивления резистора  $R_1$ :

$$R_{\text{см}} < \frac{E_{\text{см}} - U_{\text{вх мин}}^1}{I_{\text{вх}}^1}. \quad (4.2)$$

Напряжение источника смещения  $E_{\text{см}}$  выбирается из условия, что при подаче входного сигнала ( $t=t_1$ ) напряжение на входе логического элемента (точка 1) скачком уменьшается до  $U_1 < U_{\text{вх макс}}^0$ . Откуда для ТТЛ схем получаем

$$E_{\text{см}} < \Delta U_{\text{лог макс}} = 3,6\text{В}. \quad (4.3)$$

Для определения емкости конденсатора  $C_1$  необходимо учесть выше указанное ограничение (4.1). Тогда

$$C_1 \ll \frac{t_{\text{и вых}}}{R_{\text{см}}}. \quad (4.4)$$

*Расчет элементов времязадающей цепи.* Резистор  $R_3$  обеспечивают закрытое состояние логического элемента DD2. Поэтому в исходном состоянии напряжение на его входе  $U_3 = R_3 \cdot I_{\text{вх}}^0 < U_{\text{вх доп}}^0$ . Откуда получаем формулу для расчета  $R_3$ :

$$R_3 < \frac{U_{\text{вх доп}}^0}{I_{\text{вх}}^0}. \quad (4.5)$$

Для расчета емкости конденсатора  $C_2$  можно воспользоваться выражением

$$t_{\text{и вых}} = t_3 - t_1 = R_3 C_2 \cdot \ln \frac{U_3(\infty) - U_3(t_1)}{U_3(\infty) - U_3(t_3)},$$

где  $U(\infty) \approx 0$ ,  $U_3(t_1) = U^1 - U^0$  и  $U(t_3) = U_{\text{пер}}$ .

Отсюда получаем

$$C_2 = \frac{t_{\text{и вых}}}{R_3 \cdot \ln \frac{U_3(t_1)}{U_{\text{пер}}}}. \quad (4.6)$$

Особенностью расчета элементов схемы, построенной на базе ТТЛ ИМС, является то, что некоторые параметры, используемые в расчетных формулах,

неизвестны, и в справочниках их не найти. Как правило, эти параметры можно с достаточной степенью точности определить из анализа функционирования схемы ТТЛ. Рассчитав элементы в первом приближении, можно затем промоделировать работу схемы и ввести необходимую коррекцию. Поэтому применение программы моделирования в данном случае позволяет не только проверить работоспособность схемы, но и правильно выбрать элементы схемы.

Чтобы создать модель и провести моделирование, рассчитаем элементы схемы (рис. 4.2), воспользовавшись формулами (4.1) – (4.6). Задав  $E_{\text{см}} = 2,5\text{В}$ , воспользовавшись справочными данными на логический элемент 155ЛА3 и априорным значением  $U_{\text{пер}} = 1,35\text{В}$ , получим с учетом номинальных величин:  $R_{\text{см}} = 3\text{кОм}$ ,  $C_1 = 3,3\text{нФ}$ ,  $R_3 = 300\text{Ом}$ ,  $C_2 = 300\text{нФ}$ .

Схема для моделирования в программе *Design Lab* показана на рис.4.4. Источник V1 моделирует запускающий сигнал (отрицательный перепад напряжения). Его параметры отражены на рис. 4.5.

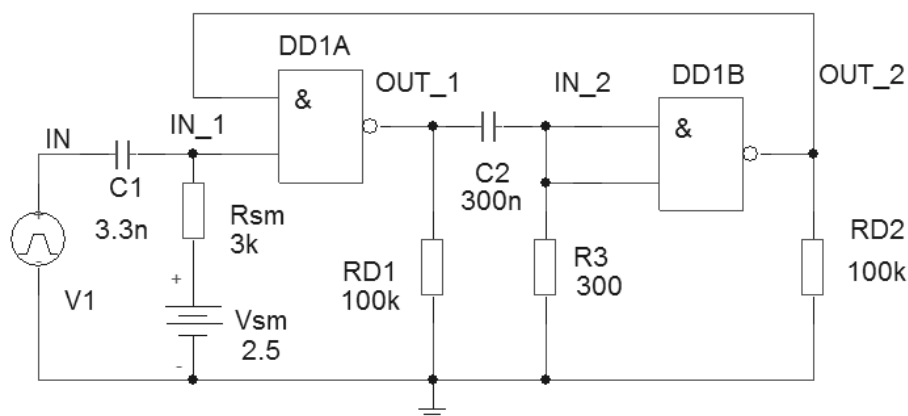


Рис. 4.4. Модель схемы одновибратора

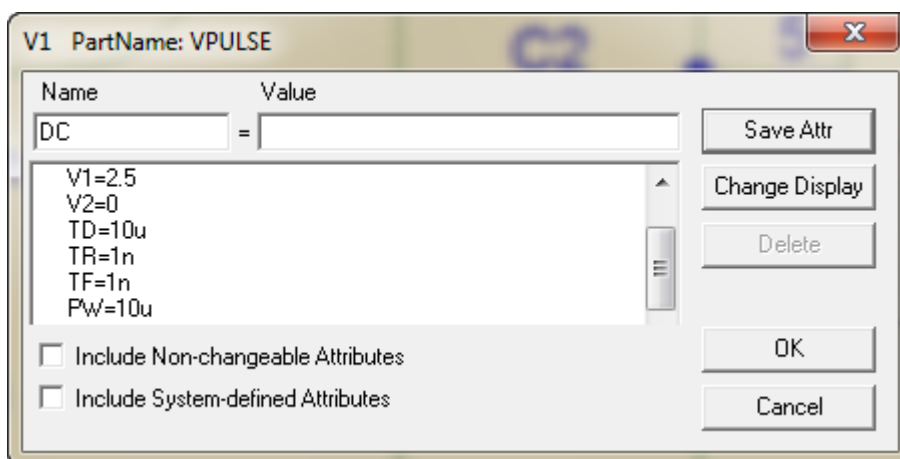


Рис. 4.5. Параметры импульсного генератора V1

В схему дополнительно включены резисторы RD1 и RD2 по 100кОм, которые не влияют на работу схемы, но позволяют отображать сигналы на выходах логических элементов в аналоговой форме.

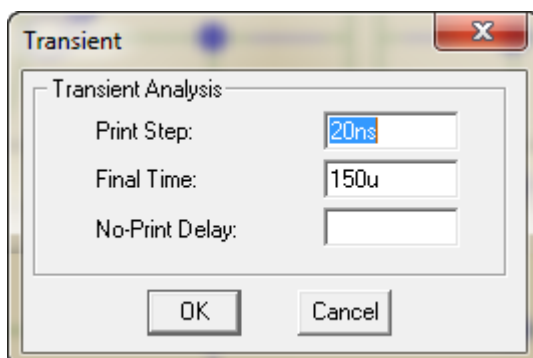


Рис. 4.6. Параметры временного анализа

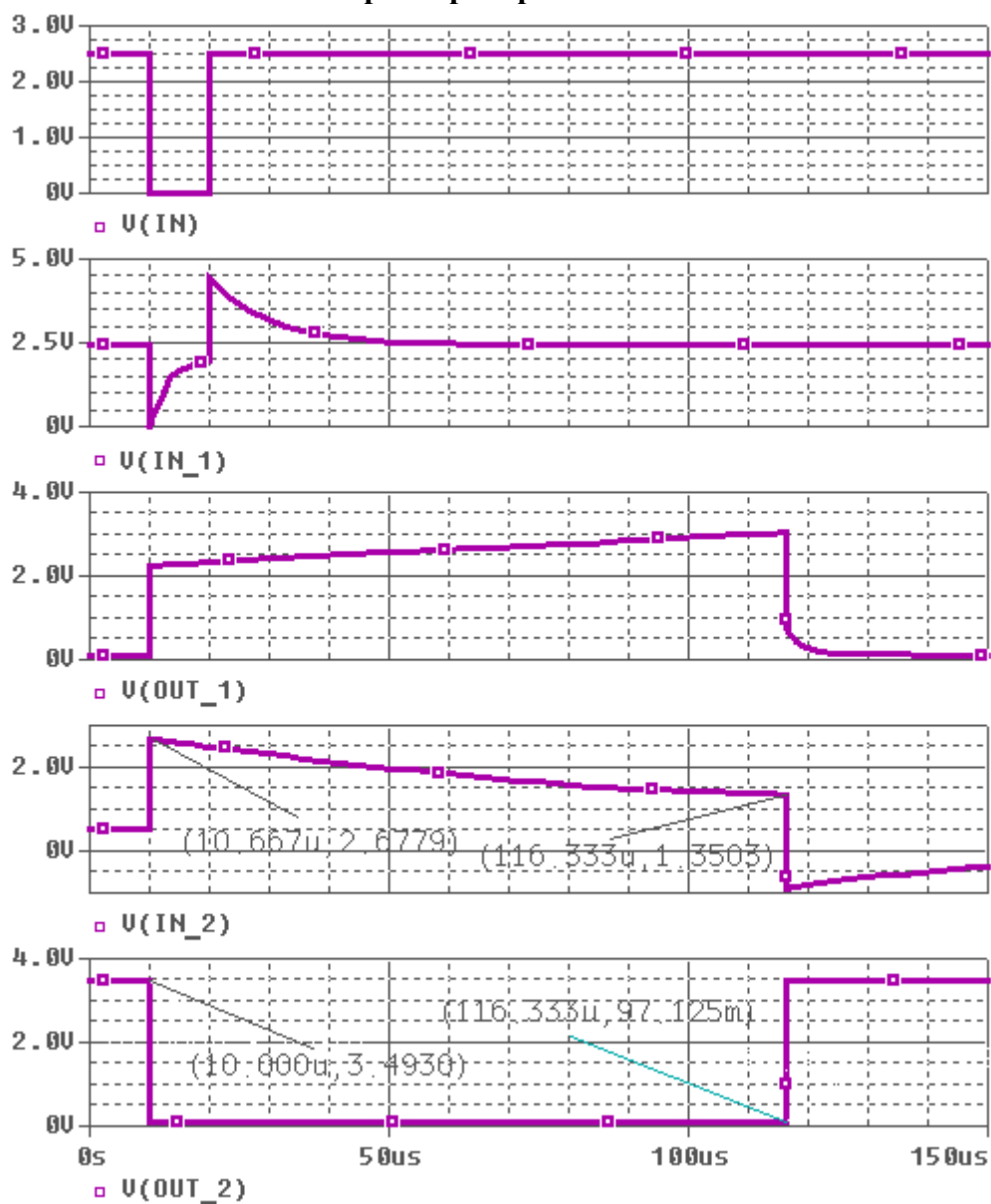


Рис. 4.7. Результаты моделирования



Анализ осциллограмм показывает, что длительность выходного импульса равна 106 мкс. Ошибка по сравнению с заданием составляет 6%, что допустимо для инженерного расчета.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Разевиг В. Д.** Применение программ P-CAD и PSPICE для схемотехнического моделирования на ПЭВМ: В 4 вып. –М.: Радио и связь, 1992.
2. **Разевиг В. Д.** Система схемотехнического моделирования и проектирования печатных плат Design Center (PSpice). – М.: СК Пресс, 1996.
3. **Разевиг В. Д.** Система схемотехнического моделирования Micro-Cap V. – М.: "Солон", 1997.
4. **Разевиг В. Д.** Система сквозного проектирования электронных устройств Design Lab 8.0. – М.: "Солон", 1999.
5. **Кобяк А.Т., Пинаев В.В.** Применение программы анализа электронных схем УПАС /Под ред. А.Н.Старостина – М.: Моск. энерг. ин-т, 1981.
6. **Кобяк А.Т., Новикова Н.Р., Паротькин В.И., Титов А.А.** Применение системы Design Lab 8.0 в курсах ТОЭ и электроники: Метод. пособие. –М.: Издательство МЭИ, 2001. –128с.
7. **NAGEL, L. W., D. O. PEDERSON.** SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). Berkeley, Calif.: University of California, Electronics Research Laboratory. Memorandum ERL-M382, Apr. 12, 1973.
8. **Cadence SPB/OrCAD 16.** <http://www.cadence.com> .

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. РАСЧЁТ И АНАЛИЗ СХЕМЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СТАБИЛИЗАТОРА	4
2. РАСЧЁТ И АНАЛИЗ СХЕМЫ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ	12
2.1. Расчет рабочего режима	12
2.2. Расчет основных параметров усилительного каскада	19
3. ЭЛЕКТРОННЫЙ КЛЮЧ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ.	28
4. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ГЕНЕРАТОРА ОДИНОЧНОГО ПРЯМОУГОЛЬНОГО ИМПУЛЬСА	34
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	41

УДК 621.3

*Учебное издание*

**Батенина Алла Павловна, Кобяк Александр Трофимович,  
Лагутина Светлана Владимировна**

**ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММЫ  
СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
DESIGN LAB 8.0 В КУРСЕ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Методическое пособие по курсу «Электроника»  
для студентов, обучающихся по направлению  
«Информатика и вычислительная техника»

Редактор издательства Н.А. Хрущева

---

Темплан издания МЭИ 2014, метод.	Подписано в печать 25.10.2014
Формат бумаги 60x84/16 Физ. печ. л. 2,5 Тираж 50 экз. Заказ 11	Изд. № 14-082

---

Оригинал-макет подготовлен в Издательстве МЭИ,  
111250, Москва, Красноказарменная ул., дом 14  
Отпечатано в ПЦ МЭИ, 111250, Москва, Красноказарменная ул., дом 13

©Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2014