

## **Лабораторная работа №2.**

### **Применение транзисторов в источниках стабилизированного напряжения и тока.**

Цели работы – исследование характеристик стабилитронов и основных схем транзисторных источников тока и напряжения, включающих в себя параметрический регулятор напряжения на стабилитроне.

#### ***2.1. Краткое описание лабораторной работы***

1. В лабораторной работе исследуется вольтамперная характеристика стабилитрона, включенного в схему параметрического регулятора напряжения.

2. Рассчитываются и исследуются схемы стабилизаторов напряжения и тока на маломощных п-р-п биполярных транзисторах.

3. Измеряются напряжение и ток при различном напряжении на входе. Пределы регулирования входного напряжения определяются исходя из типа стабилитрона.

#### ***2.2. Основные теоретические сведения***

##### ***2.2.1. Принцип действия транзисторных источников напряжения***

Большинство электронных устройств питается униполярным или биполярным стабилизированным напряжением. Электроснабжение устройств, не имеющих автономного питания, осуществляется от сети переменного напряжения, через трансформатор и выпрямитель. На выходе выпрямителя наблюдаются пульсации напряжения, которые невозможно полностью устранить с помощью пассивных фильтров. Нестабильности переменного напряжения в электрической сети и изменения тока нагрузки приводят к колебаниям уровня постоянной составляющей выходного напряжения выпрямителя. Их невозможно устранить ничем другим, кроме стабилизатора напряжения, который решает обе задачи – устранение пульсаций и стабилизация постоянной составляющей напряжения.

Простейшим способом стабилизации напряжения является применение управляемого транзисторного балласта в схеме без отрицательной обратной связи (ООС) (рис. 2.1).

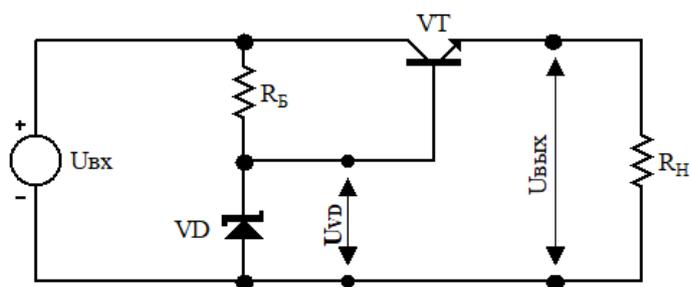


Рис. 2.1. Стабилизатор напряжения без ООС с транзисторным балластом

Схема является эмиттерным повторителем. Выходное напряжение в схеме повторителя ( $U_{\text{ВЫХ}}$ ) равно потенциалу базы относительно «земли» (общей точки входного и выходного напряжения), т.е.  $U_{\text{VD}}$ , за вычетом падения напряжения на переходе база-эмиттер транзистора ( $U_{\text{БЭ}}$ ):

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{VD}} - U_{\text{БЭ}}$$

$U_{\text{БЭ}}$  для открытого кремниевого транзистора в среднем равно 0,6 В и остается практически постоянным. Следовательно, при стабильном значении  $U_{\text{VD}}$  выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$  может оставаться достаточно стабильным в определенных пределах тока нагрузки.

Выходной ток ( $I_{\text{ВЫХ}}$ ), обеспечиваемый балластным транзистором VT, определяется как

$$I_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{Б}} + I_{\text{К}} = I_{\text{Б}} + \beta \cdot I_{\text{Б}} = (1 + \beta) \cdot I_{\text{Б}},$$

где  $I_{\text{Б}}$  – ток базы;  $I_{\text{К}}$  – ток коллектора;  $\beta$  – коэффициент усиления по току транзистора ( $\beta = I_{\text{К}}/I_{\text{Б}}$ ).

Зная требуемый ток нагрузки стабилизатора  $I_{\text{ВЫХ}}$ , коэффициент усиления по току транзистора  $\beta$  и ток стабилитрона  $I_{\text{VD}}$  при нормальном входном напряжении  $U_{\text{ВХ}}$ , можно найти необходимый ток базы транзистора  $I_{\text{Б}}$  и, соответственно, сопротивление балластного резистора  $R_{\text{Б}}$ :

$$R_{\text{Б}} = \frac{U_{\text{ВХ}} - U_{\text{VD}}}{I_{\text{Б}} + I_{\text{VD}}}$$

Мощность, выделяемая в транзисторе VT, равна произведению падения напряжения на нем и тока коллектора, который практически совпадает со значением тока на нагрузке  $I_{\text{Н}}$ :

$$P_{\text{VT}} = (U_{\text{ВХ}} - U_{\text{ВЫХ}}) \cdot I_{\text{Н}}$$

Из этой формулы видно, что мощность, рассеиваемая в балластном транзисторе, пропорциональна разности входного и выходного напряжений стабилизатора. Значения  $U_{\text{ВХ}}$  должно задаваться, исходя из возможных колебаний напряжения на выходе выпрямителя, питающего стабилизатор. С учетом того, что согласно действующим стандартам, допустимыми являются колебания напряжения в питающей электрической сети на  $\pm 10\%$ , а снижение

глубины пульсаций на выходе выпрямителя до 0% практически невозможно, рекомендуется учитывать при расчетах превышение среднего значения  $U_{ВХ}$  над заданным входным напряжением стабилизатора  $U_{ВЫХ}$  не менее чем на 25%.

Чем выше разность ( $U_{ВХ}-U_{ВЫХ}$ ), тем надежнее защита  $U_{ВЫХ}$  от случайных «провалов» входного напряжения, но, с другой стороны, тем выше мощность  $P_{VT}$ , рассеиваемая балластным транзистором, и тем хуже КПД стабилизатора. Обычно КПД линейного стабилизатора задают не менее 50%. Отсюда

$$2 \cdot U_{ВЫХ} \geq U_{ВХ} \geq 1,25 \cdot U_{ВЫХ}$$

При разорванной цепи нагрузки ( $R_H = \infty$ ) ток базы  $I_B$  отсутствует, и весь ток, ограничиваемый резистором  $R_B$ , течет через стабилитрон  $VD$ . В этом случае в стабилитроне выделяется максимальная мощность. При подключении  $R_H$  ток, протекающий через резистор  $R_B$ , разветвляется на  $I_B$  и  $I_{VD}$ . При заданном значении тока нагрузки  $I_H$  ток, отбираемый в цепи базы, описывается выражением

$$I_B = \frac{I_H}{1 + \beta} \approx \frac{I_H}{\beta}$$

Отбор тока в базу из цепи  $R_B$  приводит к снижению тока стабилитрона  $VD$ . Характеристика стабилитрона на участке стабилизации напряжения не является идеальной, и изменение тока ведет к изменению падения напряжения  $U_{VD}$  на стабилитроне. Внутреннее сопротивление стабилитрона  $r_{VD}$  вычисляется из его вольтамперной характеристики (рис. 2.2.):

$$r_{VD} = \frac{\Delta U_{VD}}{\Delta I_{VD}} = \frac{\Delta U_{VD}}{I_{\max} - I_{\min}}$$

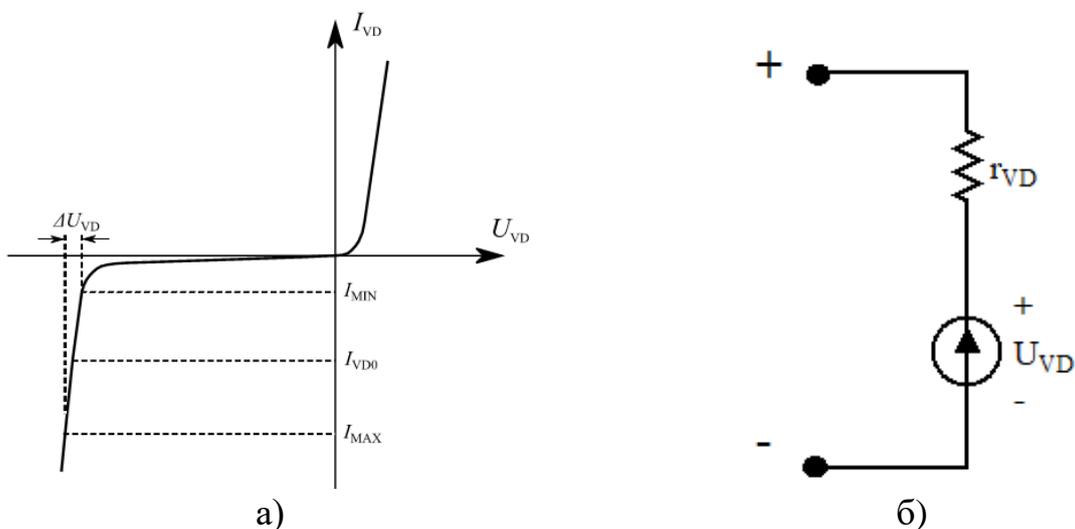


Рис. 2.2. Вольтамперная характеристика стабилитрона (а) и его эквивалентная схема для ветви стабилизации напряжения (б)

Как видно из вольтамперной характеристики стабилитрона (см. рис. 2.2, а), для качественной и надежной стабилизации напряжения ток стабилитрона должен быть не ниже  $I_{\min}$  и не выше  $I_{\max}$ .

### 2.2.2. Принцип действия транзисторных источников стабильного тока

Маломощные стабилизаторы тока (генераторы стабильного тока) необходимы в измерительных устройствах, использующих измерительный мост (мост Уитстона) и резистивные датчики физических величин. Стабилизация тока высокой интенсивности требуется в электромагнитных и нагревательных устройствах, а также для обеспечения неизменного лучистого потока источников света в светотехнике.

Маломощные стабилизаторы тока питаются от стабилизированных и нестабилизированных источников напряжения, и используют свойство статической характеристики биполярного транзистора иметь практически неизменное значение тока коллектора при неизменном токе базы (см. рис. 2.3).

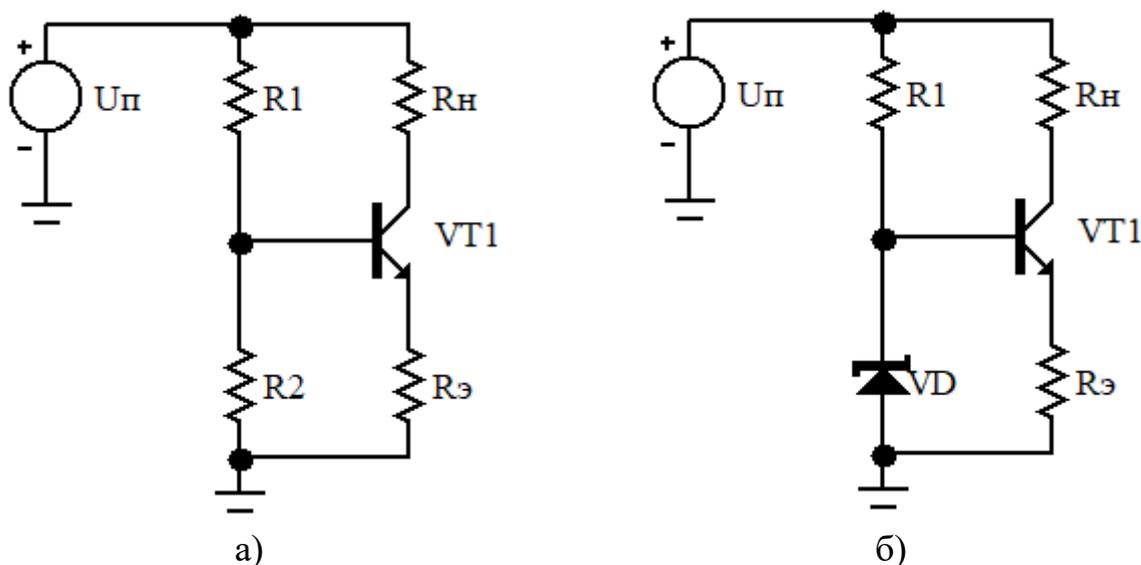


Рис. 2.3. Маломощные стабилизаторы тока: а – с резистивным делителем в цепи базы; б – со стабилизацией потенциала базы с помощью стабилитрона

Принцип работы схем, показанных на рис. 2.3, а и б совершенно одинаков. В обеих схемах требуется стабилизировать напряжение на базе транзистора. В первой схеме это достигается за счет того, что сквозной ток делителя напряжения  $R1-R2$  многократно превышает ток базы транзистора  $VT$ , а в качестве источника питания  $U_{\Pi}$  выбирается стабилизированный источник напряжения. Схема со стабилитроном  $VD$  не требует использования стабилизированного источника питания и является, таким образом, более

совершенной. Потенциал эмиттера  $U_{\text{Э}}$  [В] относительно общей точки схемы определяется как

$$U_{\text{Э}} = U_{\text{Б}} - U_{\text{Б-Э}} = U_{\text{Б}} - 0,6,$$

где  $U_{\text{Б}} = U_{\text{ВД}}$  – для схемы со стабилитроном или  $U_{\text{Б}} = U_{\text{П}} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$  – для схемы с делителем напряжения.

Ток эмиттера для обеих схем при неизменном  $R_{\text{Э}}$ , является величиной постоянной и практически равен коллекторному току  $I_{\text{К}}$ :

$$I_{\text{Э}} = \frac{U_{\text{Б}} - 0,6}{R_{\text{Э}}} \approx I_{\text{К}}.$$

Падение напряжения на транзисторе VT определяется выражением  $U_{\text{К-Э}} = U_{\text{П}} - (R_{\text{Н}} I_{\text{К}} + R_{\text{Э}} I_{\text{К}})$ . Очевидно, что стабилизация тока возможна лишь в таких пределах изменения  $R_{\text{Н}}$ , при которых падение напряжения на VT не достигнет напряжения насыщения ( $U_{\text{К-Э}}$  менее 1 В для кремниевого транзистора).

### 2.3. Задание на лабораторную работу

1. Соберите схему измерения напряжения стабилизации стабилитрона (рис. 2.4), также известную как схема параметрического регулятора напряжения.

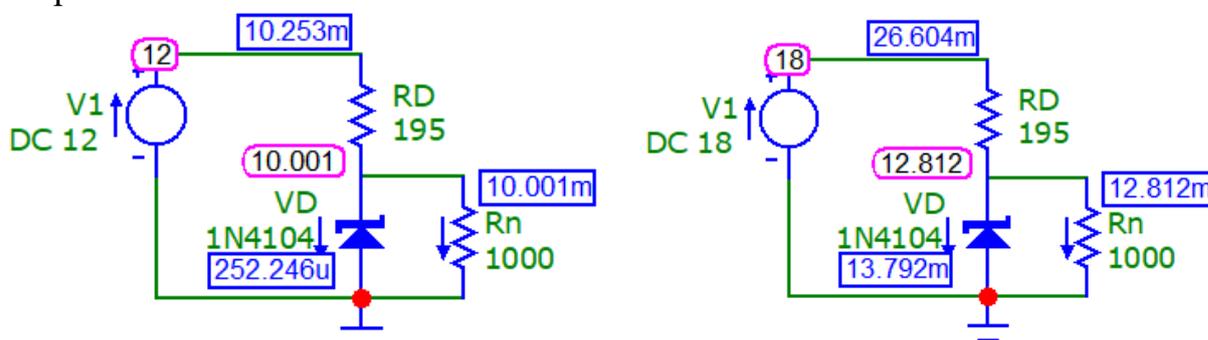


Рис. 2.4. Схема измерения напряжения стабилизации

Напряжение питания изменяется в диапазоне  $(1,2...1,8) \cdot U_{\text{Z}} = 12...18 \text{ В}$ .

Сопротивление нагрузки возьмите равным 1КОм.

Сопротивление резистора  $R_{\text{D}}$  выбирается с таким расчетом, чтобы ток через стабилитрон оставался бы в рамках допустимых значений для данного стабилитрона. Падение напряжения на стабилитроне в обратной ветви его характеристики  $U_{\text{Z}}$  и допустимые пределы его тока стабилизации являются справочными величинами и берутся из документации на стабилитрон. В данном примере используется стабилитрон 1N4104, у которого номинальный ток стабилизации (zener test current) составляет 0,25 мА. При протекании номинального тока через стабилитрон на нем падает напряжение

стабилизации 10 В (nominal zener voltage). Максимальный допустимый ток этого стабилитрона – 38 мА, см рис. 2.5.

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS @ 25°C, unless otherwise specified.**

JEDEC TYPE NUMBER	NOMINAL ZENER VOLTAGE $V_Z @ I_{ZT}$ (Note 1)	ZENER TEST CURRENT $I_{ZT}$	MAXIMUM ZENER IMPEDANCE $Z_{ZT}$ (Note 2)	MAXIMUM REVERSE LEAKAGE CURRENT $I_R @ V_R$		MAXIMUM NOISE DENSITY $N_D @ I_{ZT}$	MAXIMUM ZENER CURRENT $I_{ZM}$
	VOLTS	$\mu A$	OHMS	$\mu A$	VOLTS	$\mu V / \sqrt{Hz}$	mA
1N4099	6.8	250	200	10	5.17	40	56
1N4100	7.5	250	200	10	5.70	40	51
1N4101	8.2	250	200	1.0	6.24	40	46
1N4102	8.7	250	200	1.0	6.61	40	44
1N4103	9.1	250	200	1.0	6.92	40	42
1N4104	10	250	200	1.0	7.60	40	38

Рис. 2.5. Электрические характеристики стабилитрона 1N4104

Пусть входное напряжение меняется от 12 В до 18 В. Рассчитаем значение  $R_D$ , которое обеспечит протекание номинального тока (0,25 мА) через стабилитрон при минимальном напряжении питания (12 В). Ток через сопротивление нагрузки:

$$I_n = U_{VD} / R_n = 10 / 10^3 = 10 \text{ mA}.$$

Суммарный ток стабилитрона и нагрузки:

$$I_\Sigma = I_{ZT} + I_n = 10,25 \text{ mA}.$$

$$R_D = (U_{\min} - U_Z) / I_\Sigma = (12 - 10) / (10,25 \cdot 10^{-3}) \approx 195 \text{ Ом}$$

В случае максимума входного напряжения ток  $I_{ZT}$  будет максимальным, однако он не должен превышать максимально допустимый ток стабилитрона согласно паспорту, т.е. не более  $I_{ZM} = 38 \text{ mA}$ .

Сохраните в отчет результаты *Dynamic DC* анализа при напряжении питания  $U_{\min}$  и  $U_{\max}$ . Обратите внимание на изменение напряжения на нагрузке и тока через нагрузку. Вычислите это изменение в процентах. За 100% возьмите значения при  $U_{\min}$ .

2. Снимите вольтамперную характеристику стабилитрона.

Для этого запустите DC анализ: *Analysis -> DC...* (Alt+3).

В настройках анализа в панели *Sweep* в качестве варьируемой переменной *Variable 1* выберите источник питания V1. Диапазон изменения *Range*  $(0,95 \dots 1,8) \cdot U_Z = 9,5 \dots 18 \text{ В}$ . Шаг 0,1 В.

В окне *X Expression* введите напряжение на стабилитроне  $V(VD)$ . В окне *Y Expression* – ток стабилитрона  $I(VD)$ .

В окне *X Range* и *Y Range* задается масштаб по осям графика в формате  $X_{\max}, X_{\min}, Step$ . Установите значения, при которых график вольтамперной характеристики будет хорошо виден.

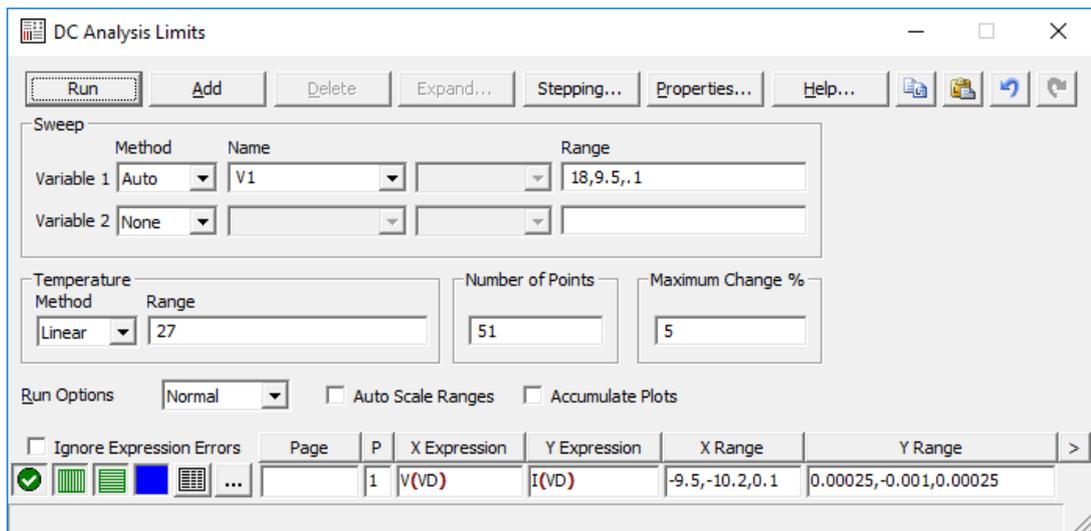


Рис. 2.6. Настройки DC анализа

Запустите анализ нажатием кнопки *Run*. В отдельном окне появится график вольт-амперной характеристики.

Откройте настройки отображения графика, дважды щелкнув по нему левой кнопкой мыши. В окне *Properties for DC Analysis* на вкладке *Colors, Fonts and Lines* настройте толщину линии графика и величину текста для удобного отображения графика.

Установите два маркера на графике с помощью кнопки . Координаты первого маркера ( $U_Z$ ,  $I_{ZT}$ ). Второй маркер отстоит от первого на 0,1 В (см. Рис. 2.7). Не забудьте установить толщину линий маркера (*Width*) и размер текста (кнопка *Font...*).

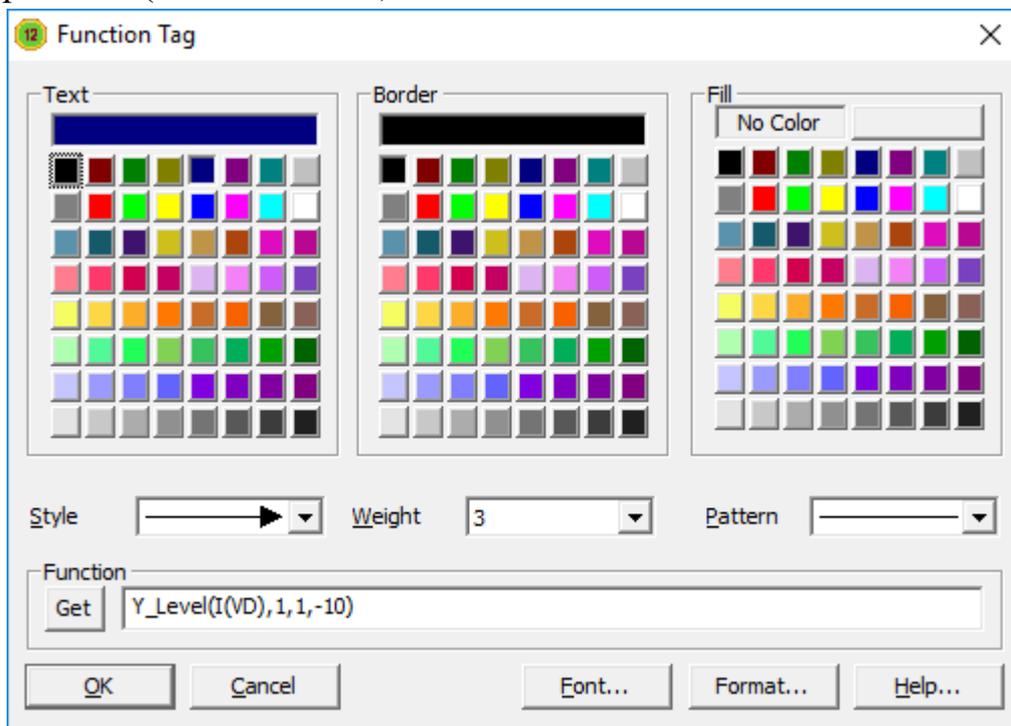


Рис. 2.7. Настройки отображения маркера.



нагрузке и тока через нагрузку. Вычислите это изменение в процентах. За 100% возьмите значения при  $U_{min}$ .

4. Соберите схему стабилизатора тока со стабилизацией потенциала базы с помощью стабилитрона (рис. 2.10).

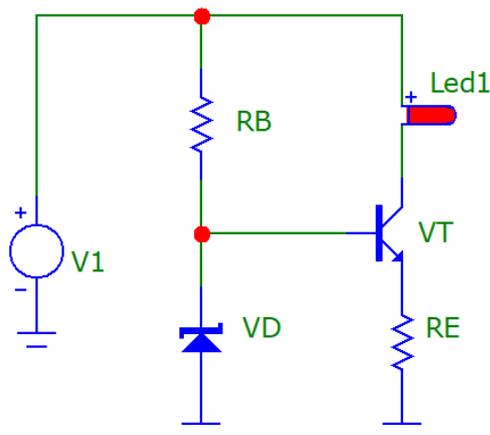


Рис. 2.10. Маломощный стабилизатор тока со стабилизацией потенциала базы с помощью стабилитрона

В этой схеме в качестве нагрузки выступают светодиоды, которые включаются в коллекторную цепь транзистора. Ток эмиттера при неизменном  $R_E$  является величиной постоянной и практически равен коллекторному току  $I_K$ :

$$I_E = \frac{U_B - U_{BE}}{R_E} \approx I_K.$$

Напряжение на базе равно напряжению на стабилитроне:  $U_B = U_Z$ , таким образом, величина стабилизируемого тока однозначно задается сопротивлением резистора  $R_E$ .

Значение резистора  $R_B$  рассчитывается также, как и для стабилизатора напряжения. Обратите внимание на то, что источник стабильного тока является, фактически, регулятором напряжения с  $R_E$  в качестве нагрузки. Ток, протекающий через этот резистор, таким образом, стабилен. Ток, протекающий через светодиод, за вычетом малого тока базы, равен току  $I_E$  и соответственно, тоже стабилен.

Рассчитаем номинал резистора  $R_E$  для схемы рис. 2.10.

Нам известно напряжение стабилизации  $U_Z = 10$  В, которое является также напряжением на базе транзистора VT. На базно-эмиттерном переходе кремниевого транзистора падает напряжение  $\approx 0,7$  В. Значит на резисторе  $R_E$  будет падать напряжение  $U_E = U_B - U_{BE} \approx 10 - 0,7 = 9,3$  В. Для питания светодиода необходимо обеспечить протекание через него тока определенной величины. Значение этого тока можно посмотреть в параметрах модели светодиода, рис. 2.11.

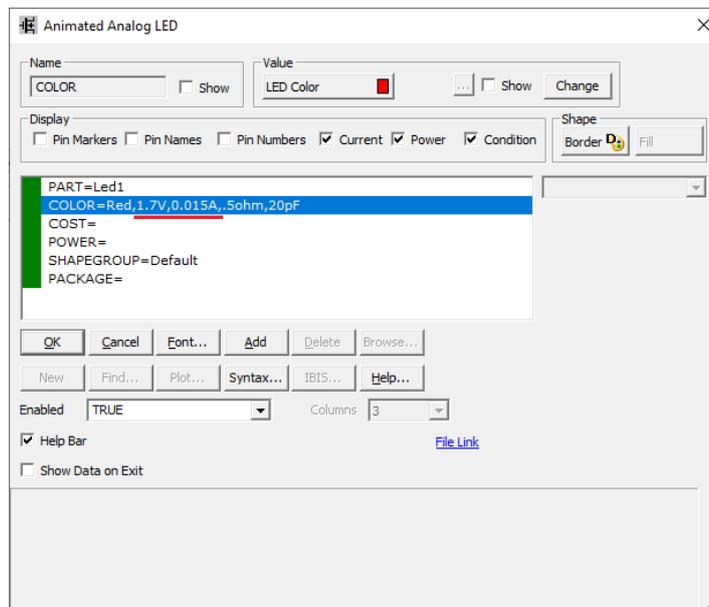


Рис. 2.11. Параметры модели светодиода.

Необходимо обеспечить ток светодиода 15 мА. При протекании этого тока на светодиоде будет падать напряжение 1,7 В.

Возьмем для расчетов значение тока с небольшим запасом. Пусть  $I_{VD2} = 16$  мА. Рассчитаем  $R_E$ :

$$R_E = U_E / I_E \approx 9,3 / 0,016 \approx 581 \text{ Ом}$$

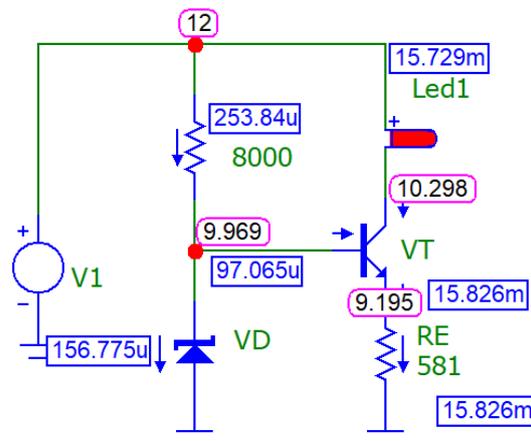


Рис. 2.12. Расчет по постоянному току (Dynamic DC)

Запустите *Dynamic DC* анализ.

Сохраните в отчет результаты *Dynamic DC* анализа при напряжении питания  $U_{min}$  и  $U_{max}$ . Обратите внимание на изменение тока на нагрузке. Вычислите это изменение в процентах. За 100% возьмите значения при  $U_{min}$ .

5. Сделайте выводы о работе схем стабилизаторов напряжения и тока. Приведите основные результаты работы схемы – относительные отклонения токов и напряжений.

Таблица 2.1 – Наименования используемых в лабораторной работе транзисторов и стабилитронов в соответствии с вариантом

№ бригады	Транзистор	Стабилитрон
1	2N4124	1N4104
2	BC550	1N747
3	BC107A	1N749
4	BC108A	1N751
5	BC183A	1N752
6	BC184	1N753
7	BC238A	1N754
8	BC308A	1N755
9	BF959	1N756
10	2N3904	1N757
11	BC547	1N758
12	BC546	1N960A