

Генератор стабильного тока, токовое зеркало и их применение в дифференциальном усилительном каскаде

Генератор стабильного тока (ГСТ) – это схема, обеспечивающая протекание через нагрузку тока, не зависящего от ее сопротивления. Моделью такой схемной конфигурации служит идеальный генератор тока с бесконечным внутренним сопротивлением R_0 (рис. 1а).

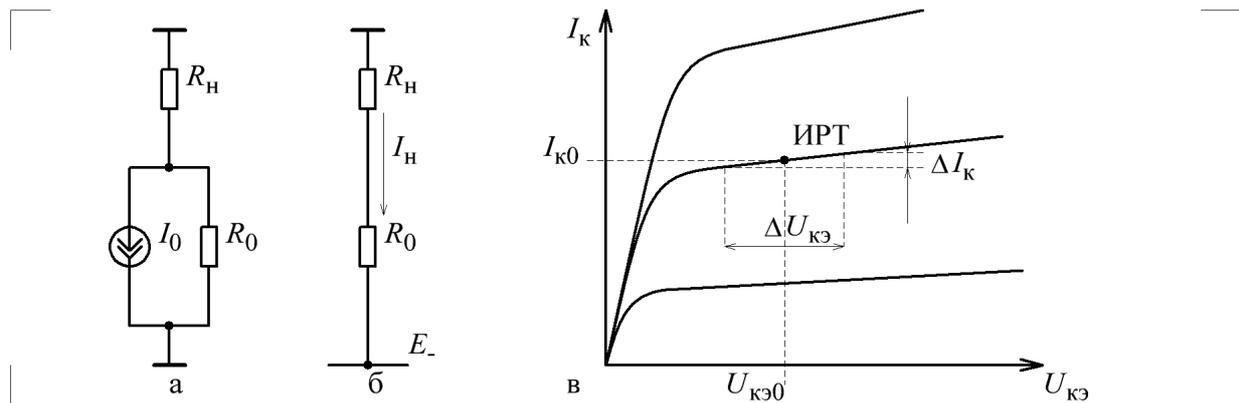


Рис. 1

На практике зачастую ГСТ получают путем соединения источника питания (источника ЭДС) последовательно с сопротивлением R_0 , много большим сопротивления нагрузки (рис. 1б). В этом случае

$$I_H = \frac{E_-}{R_0 + R_H} \approx \frac{E_-}{R_0},$$

и ток через нагрузку слабо зависит от ее сопротивления. Это соотношение выполняется тем лучше, чем больше ЭДС источника, что является недостатком такого простейшего схемного построения.

Более широкое применение получили ГСТ, основанные на применении нелинейных элементов. Рассмотрим, например, выходную ВАХ биполярного транзистора (рис. 1в). Здесь в окрестности исходной рабочей точки при относительно небольшом напряжении $U_{кэ0}$ реализуется динамическое сопротивление участка коллектор-эмиттер

$$r_{кэ} = \frac{\Delta U_{кэ}}{\Delta I_k} \approx \frac{U_{Эрли} + U_{кэ0}}{I_k},$$

которое может быть сделано большим при невысоком напряжении питания.

Данный принцип генерации стабильного тока иллюстрируется схемой рис. 2а.

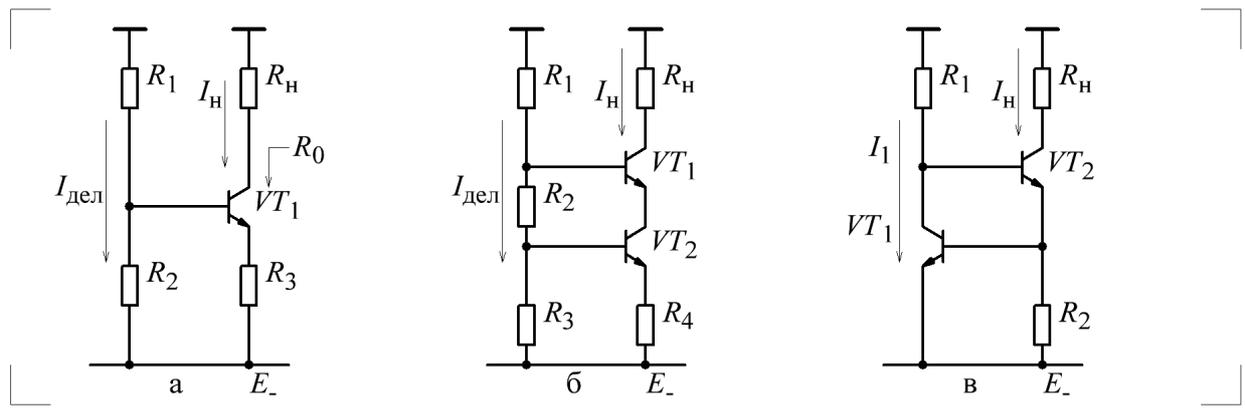


Рис. 2

Собственно ГСТ образован транзистором VT_1 и резисторами $R_1 \dots R_3$. По сути – это схема стабилизации положения ИРТ с фиксированным током эмиттера. Малосигнальное выходное сопротивление ГСТ со стороны нагрузки можно оценить как выходное сопротивление схемы ОЭ_F при условии, что в качестве R_F выступает резистор R_3 .

$$R_0 = R_{\text{выход} F} = \frac{1 + g_{21} R_3}{g_{22}} \approx \frac{g_{21} R_3}{g_{22}} .$$

Если $U_{\text{Эрли}} = 100 \text{ В}$, $I_0 = 1 \text{ мА}$, $R_3 = 1000 \text{ Ом}$, то $R_0 = 3,8 \text{ МОм}$.

Расчет требуемых сопротивлений резисторов выполняется аналогично тому, как это делается для обеспечения положения ИРТ с учетом того, что в данной схеме использован источник питания с отрицательным напряжением.

$$I_0 = \frac{U_{R3}}{R_3} \approx \frac{|E_-| \frac{R_2}{R_1 + R_2} - U_{\text{бэ}0}}{R_3} .$$

К недостатку такого построения ГСТ относится зависимость тока I_0 от напряжения на нагрузке. Фактически – это проявление зависимости I_K от напряжения $U_{KЭ}$ из-за ненулевого значения g_{12} .

Для снижения этого влияния используется схемное построение, аналогичное каскодной усилительной схеме (рис. 2б). В этой схеме ГСТ построен на транзисторе VT_2 , а транзистор VT_1 является повторителем тока. Одновременно VT_1 фиксирует напряжение на коллекторе транзистора VT_2 , снижая влияние напряжения на нагрузке на ток I_0 .

Недостатком обеих конфигураций является зависимость тока от напряжения питания. Частично устранить этот недостаток позволяет схема рис. 2в. В

этом случае напряжение на токозадающем резисторе R_2 фиксировано напряжением открытого эмиттерного перехода транзистора VT_1 , и слабо зависит от напряжения питания.

Во всех рассмотренных схемах необходимо следить за тем, чтобы транзисторы находились в активном режиме (рабочая точка не выходила за пределы пологого участка выходной ВАХ).

В качестве примера на рис. 3 приведено применение ГСТ для задания эмиттерных токов транзисторов дифференциального усилительного каскада. На рис. 3а транзисторы VT_1 и VT_2 – это транзисторы дифференциальной пары, а VT_3 совместно с резисторами $R_1 \dots R_3$ образует ГСТ. На рис. 3б продемонстрировано применение резистора обратной связи R_F . В этом случае использовано 2 ГСТ на транзисторах VT_3 и VT_4 . Особенностью является применение для них общего резистивного делителя R_1, R_2 .

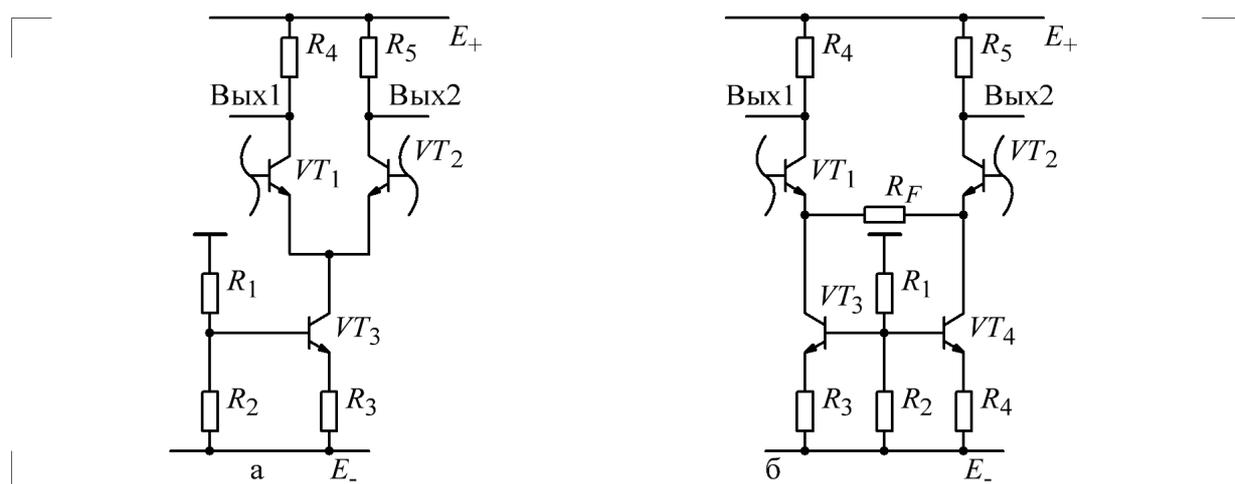


Рис. 3

Другое применение ГСТ – это так называемая динамическая нагрузка. Для обеспечения работы транзистора в активной области необходимо обеспечить подучу постоянного напряжения на коллектор транзистора. В то же время с точки зрения передачи сигнала с коллектора в нагрузку протекание тока сигнала через цепь питания транзистора нежелательно. Поэтому для переменного сигнала цепь питания коллектора стремятся сделать с высоким сопротивлением для переменного сигнала, включая высокоомные резисторы или дроссели. Для этой же цели в коллекторной цепи можно использовать ГСТ (рис. 4а).

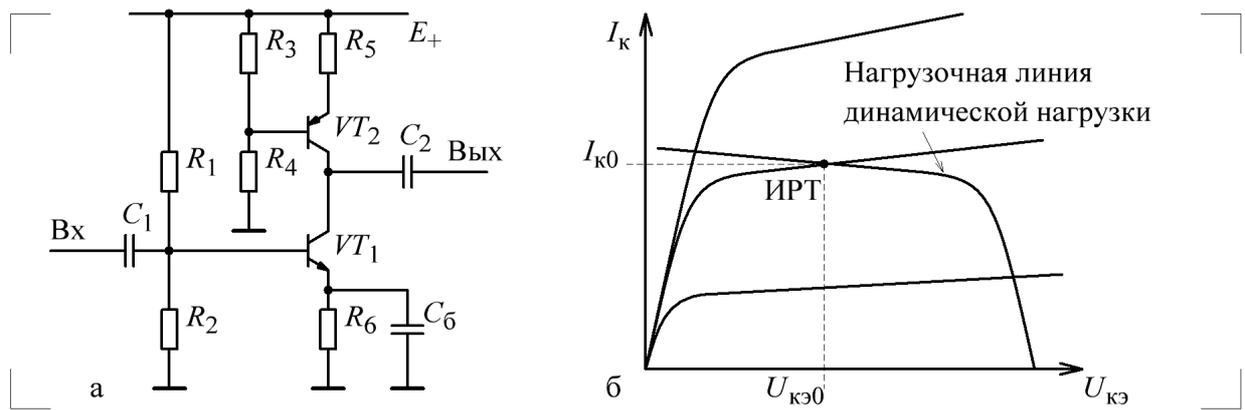


Рис. 4

Принцип работы динамической нагрузки иллюстрирует рис. 4б, где показаны выходные ВАХ усилительного транзистора (VT_1) и нагрузочная линия, фактически являющаяся одной из выходных ВАХ транзистора ГСТ (VT_2). И графика видно, что наклон нагрузочной линии в окрестности ИРТ мал, что соответствует выходному сопротивлению ГСТ.

Альтернативный путь построения ГСТ – это так называемое токовое зеркало. Токовое зеркало это схемная конфигурация, обеспечивающая протекание через нагрузку тока, связанного с током в другой, токозадающей ветви. Название схемы происходит из возможности получения тока в одной ветви равного току другой ветви.

Базовая схемная конфигурация токового зеркала приведена на рис. 5а.

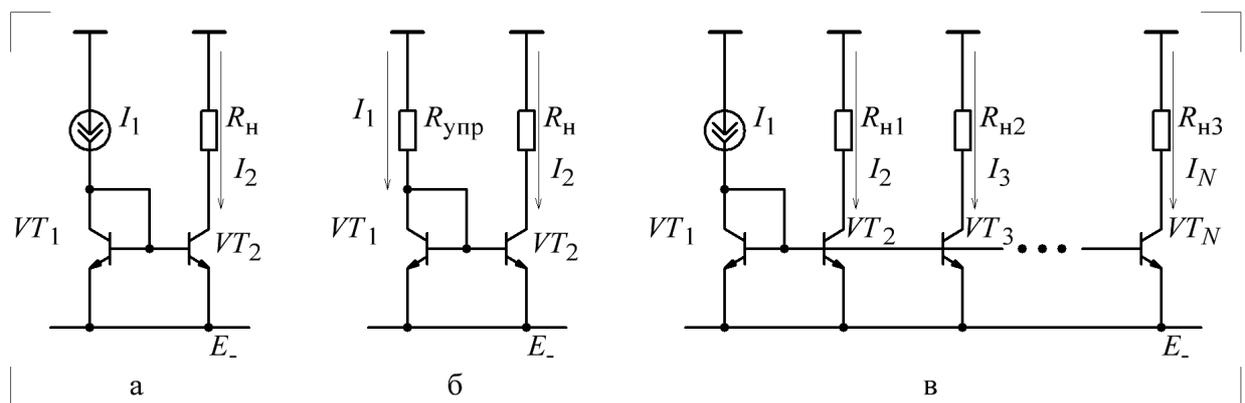


Рис. 5

Принцип работы этой схемы следующий. Ток I_1 , протекая через транзистор VT_1 , создает падение напряжения между его базой и эмиттером в соответствии с соотношением Эберса-Молла.

$$I_{\text{э}} = I_{\text{оэ}} e^{\frac{U_{\text{бэ}}}{mU_T}}; U_{\text{бэ}} = mU_T \ln\left(\frac{I_{\text{э}}}{I_{\text{оэ}}}\right),$$

где m – коэффициент неидеальности p - n -перехода ($m = 1$ при малых значениях тока $I_{\text{к0}}$, когда $I_{\text{к}} \ll I_{\text{кmax}}$, и $m = 2...5$ при значениях токах коллектора, приближающихся к максимально допустимым $I_{\text{кmax}}$); $U_T = k T / q$ – температурный потенциал; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/с – постоянная Больцмана; T – температура в кельвинах; $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; $I_{\text{оэ}}$ – обратный ток эмиттерного перехода. При номинальной температуре $T = 300$ К $U_T = 0,026$ В.

Это напряжение между его базой и эмиттером транзистора VT_1 , будучи приложено к эмиттерному переходу транзистора VT_2 в силу того же соотношения обеспечивает протекание коллекторного тока I_2 в цепи нагрузки. Если транзисторы одинаковы, то $I_1 = I_2$. Параметр $I_{\text{оэ}}$ в уравнении Эберса-Молла пропорционален площади эмиттерного перехода. Значит, выбирая транзисторы с определенным соотношением площадей эмиттерных переходов, можно добиваться определенных соотношений между токами I_1 и I_2 .

На практике в качестве ГСТ токозадающей ветви используется резистор с большим сопротивлением (рис. 5б). Это решение оправдано при условии, что $|E_-| \gg U_{\text{бэ0}}$.

Подключая несколько транзисторов во вторичные ветви (рис. 5в), можно получить несколько токов, функционально зависящих от одного общего тока. Это удобно в интегральной микроэлектронике, когда одним внешним элементом, например резистором, устанавливается режим работы множества различных каскадов.

При использовании одинаковых транзисторов произвольное соотношение между токами первичной и вторичной цепей можно получить, устанавливая в эмиттерные цепи транзисторов дополнительные резисторы, как это показано на рис. 6а или в частном случае на рис. 6б.

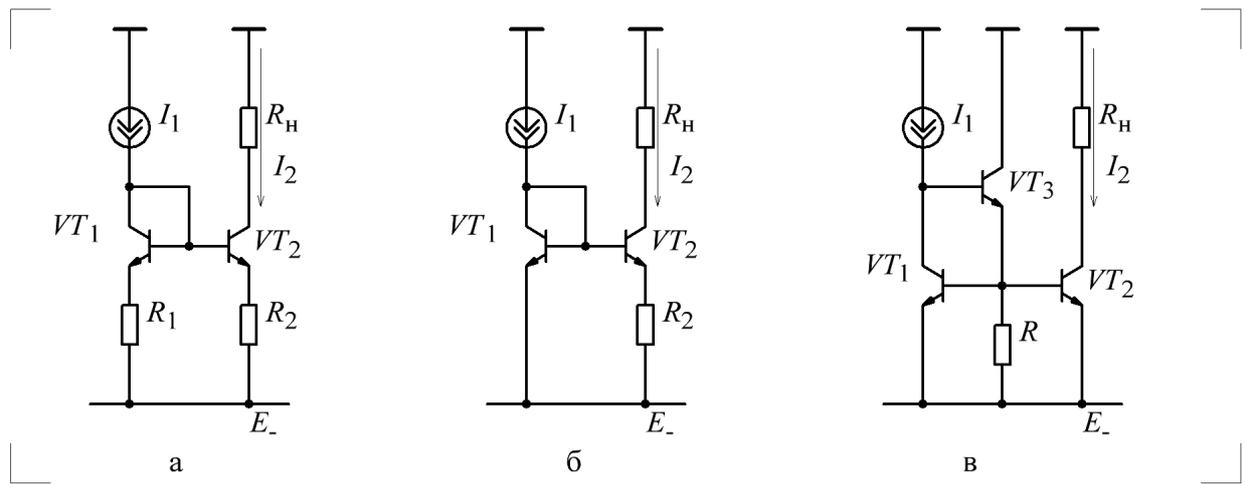


Рис. 6

Погрешность установки токов в нагрузочной цепи приведенных схем связана с протеканием токов баз транзисторов. Действительно в схеме рис. 6а $I_2 = I_{к2}$, а $I_1 = I_{к1} + 2 I_б$. Для снижения этой погрешности используется дополнительный транзистор (рис. 6в), который можно рассматривать как усилитель тока. В этом случае $I_1 = I_{к1} + I_{б3}$, где $I_{б3} \ll 2 I_{б2}$.

В схеме на рис. 7а при использовании одинаковых транзисторов выполняются следующие соотношения между токами.

$$I_2 = I_{к3} = I_{э3} - I_{б3} = I_{к2} + I_{б2} + I_{б1} - I_{б3}.$$

$$I_1 = I_{к1} + I_{б3}.$$

При условии $I_{б2} = I_{б1} = I_{б3}$ это означает $I_1 = I_2$, то есть полную компенсацию базовых токов.

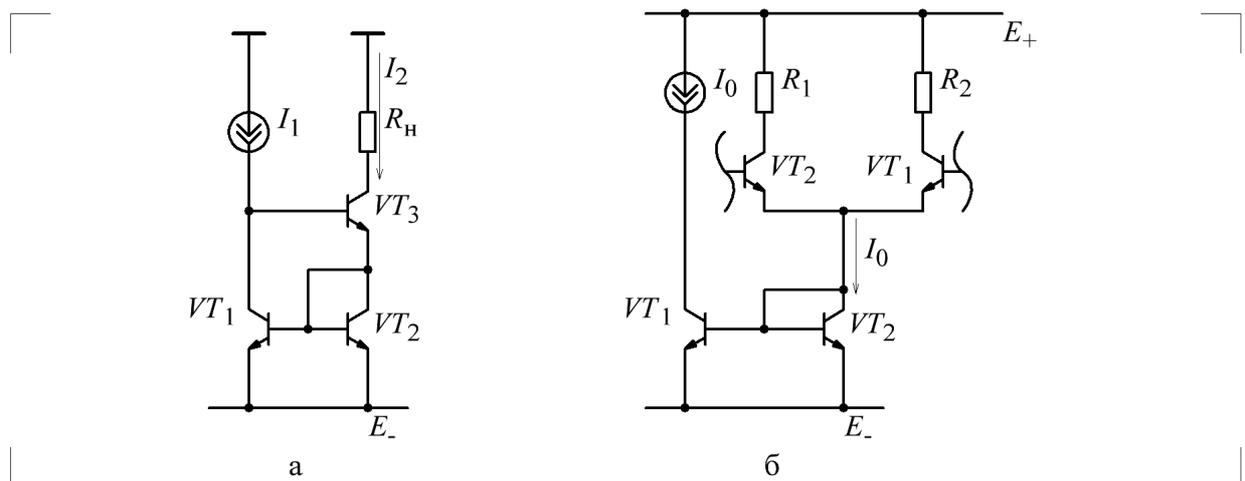


Рис. 7

На рис. 7б приведен пример применения токового зеркала для обеспечения токов эмиттеров дифференциального каскада.

Рис. 8 иллюстрирует работу токового зеркала в качестве динамической на-

грузки.

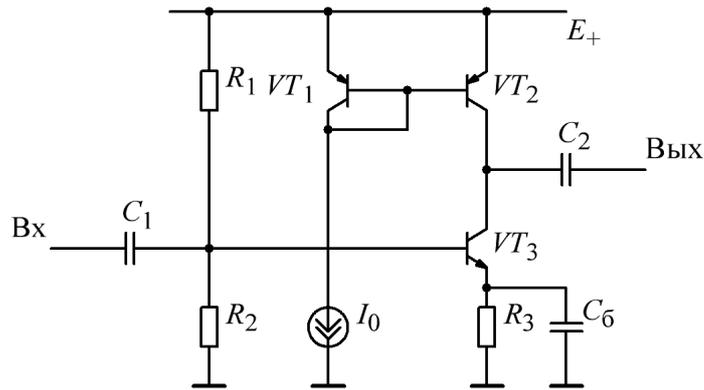


Рис. 8

Здесь VT_3 – это каскад ОЭ, а транзисторы VT_1 и VT_2 $p-n-p$ -структуры по схеме токового зеркала являются для него коллекторной нагрузкой.