

## 4. БАЗОВЫЕ СХЕМНЫЕ КОНФИГУРАЦИИ АНАЛОГОВЫХ МИКРОСХЕМ И УСИЛИТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 4.1. Дифференциальный усилительный каскад, его основные свойства и схемные реализации

#### Особенности построения аналоговых интегральных микросхем

В случае микросхемного исполнения многокаскадные широкополосные усилители реализуются, как правило, с непосредственными (или гальваническими) связями между отдельными каскадами, соединенными последовательным образом. При этом разделительные конденсаторы отсутствуют, и на последующие каскады подается не только усиленный сигнал переменного тока, но и постоянные потенциалы. Такие усилители называют усилителями постоянного тока (УПТ). Ярким примером УПТ с гальваническими связями является интегральный операционный усилитель, широко используемый в микросхемотехнике.

При создании УПТ приходится решать следующие задачи:

- 1) уменьшение влияния дрейфа нуля, под которым понимают нестабильность выходного напряжения (или тока) усилителя при нулевом значении напряжения на входе;
- 2) необходимость согласования постоянных потенциалов на входе и выходе соседних каскадов без потери усиления переменного сигнала (трансляция постоянных уровней);
- 3) обеспечение устойчивости работы многокаскадных УПТ с минимальными потерями усиления (частотная коррекция УПТ).

Весьма неприятным явлением в УПТ является дрейф нуля (ДН). Его причины:

- температурное изменение рабочих точек транзисторов;
- изменение питающих напряжений;
- температурные изменения характеристик и старение как пассивных, так и активных компонентов схемы.

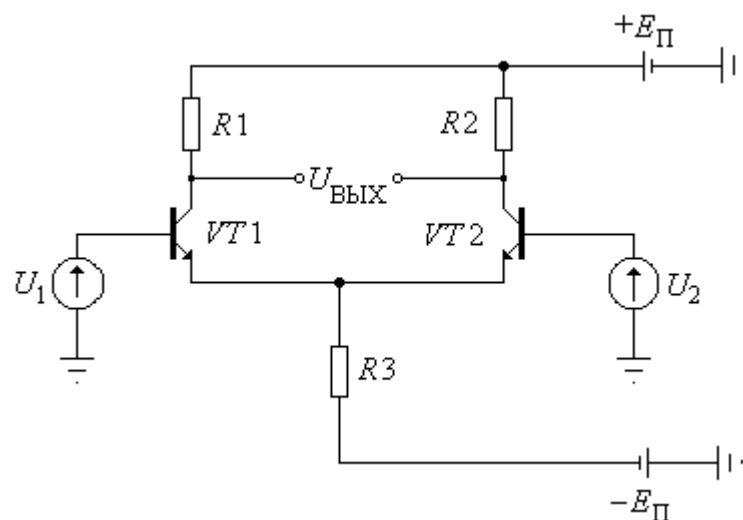
Величина дрейфа нуля (ДН) оценивается величиной приведенного ко входу напряжения, которое вызывает такое же изменение выходного напряжения, как и изменения, обусловленные дрейфом.

Особенно опасен ДН первого каскада УПТ, так как он усиливается всеми последующими каскадами. Поэтому наиболее эффективны те меры, которые уменьшают дрейф первого, входного каскада.

В этом смысле наиболее радикальным схемотехническим решением является использование в УПТ дифференциальных каскадов.

### Дифференциальный каскад

Дифференциальный каскад (ДК) является входным в усилителях постоянного тока, в том числе в микросхемных операционных усилителях (ОУ), так как эффективно подавляет дрейф нуля, являющийся серьезной помехой при усилении постоянных и медленно меняющихся напряжений. Такие каскады выполняются как на биполярных, так и на полевых транзисторах и имеют множество схемотехнических решений [1]. Упрощенная принципиальная схема ДК на биполярных транзисторах приведена на рис. 4.1.



**Рис. 4.1. Упрощенная принципиальная схема дифференциального каскада**

Схема дифференциального каскада включает в себя два плеча: левое, куда входит транзистор VT1 и резистор R1, и правое, куда входит транзистор VT2 и резистор R2. Для эффективного подавления дрейфа обеспечивают симметрию схемы,

устанавливая идентичные транзисторы и одинаковые номиналы резисторов  $R1$  и  $R2$ .

Так как дифференциальный каскад используется для усиления медленно меняющихся и постоянных напряжений, то необходимо обеспечить гальваническую, т.е. непосредственную, без разделительных конденсаторов, связь внешних источников напряжения  $U_1$  и  $U_2$  с соответствующими входами каскада. При гальванической связи не только медленные колебания, но и приращения постоянной составляющей на каком-либо входе каскада воспринимаются как полезный сигнал, поэтому в отсутствие сигнала необходимо обеспечить нулевое напряжение на базах транзисторов относительно корпуса (земли) для того, чтобы исключить ложную регистрацию сигнала в его отсутствие.

Для обеспечения нулевого напряжения на базах в схему ДК дополнительно вводят источник питания с отрицательным напряжением относительно корпуса и резистор  $R3$ . Подбором номинала резистора  $R3$  можно обеспечить на эмиттерах транзисторов напряжение, равное по модулю требуемому постоянному напряжению база-эмиттер, но противоположное ему по знаку. При использовании в ДК  $n-p-n$  транзисторов (как, например, в схеме рис. 4.1) требуемое напряжение база-эмиттер может находиться в пределах  $(+0,6 \dots +0,9)$  В. Если подобрать номинал резистора  $R3$  так, чтобы напряжение на эмиттере равнялось  $(-0,6 \dots -0,9)$  В, то будет обеспечен типовой режим при нулевом напряжении на базе относительно корпуса.

Рассмотрим работу ДК, когда выходное напряжение снимается между коллекторами транзисторов  $VT1$  и  $VT2$  (так называемый симметричный съем выходного сигнала).

Отключим от входов ДК сигналы и замкнем входы на корпус. Вследствие симметрии схемы коллекторные токи каждого плеча должны иметь равные постоянные значения, а, значит, потенциал коллектора левого плеча должен равняться потенциалу коллектора правого плеча, а разность этих потенциалов должна равняться нулю. Однако, из-за случайного характера процесса эмиссии носителей заряда в транзисторе, коллекторный ток каждого плеча содержит не

только постоянную составляющую, но и флуктуации тока, которые носят случайный характер, а потому неодинаковы в левом и правом плече. Это приводит к отклонению от нуля разности коллекторных напряжений – к «дрейфу нуля». Если подобрать транзисторы с высокой степенью идентичности параметров и обеспечить им одинаковый температурный режим, то флуктуации коллекторного тока одного плеча будут приблизительно повторять флуктуации коллекторного тока другого плеча, иначе говоря, эти флуктуации будут коррелированы. При коррелированности флуктуаций коллекторных токов будут коррелированы и флуктуации потенциалов коллекторов, т.е. эти потенциалы будут меняться почти синфазно. Если бы указанные потенциалы менялись в одинаковой степени, то их разность равнялась бы нулю. Однако, из-за случайного характера флуктуаций, потенциалы коллекторов не изменяются в точности синфазно, хотя и в сильной степени ослабляются. Таким образом, при симметричном съеме выходного сигнала дифференциальный каскад ослабляет (подавляет) дрейф нуля и увеличивает отношение сигнал/помеха, что и обусловило применение ДК в качестве входного каскада в операционных усилителях (ОУ). Степень подавления дрейфа нуля тем выше, чем больше степень идентичности параметров транзисторов и номиналов резисторов в коллекторной нагрузке каждого плеча.

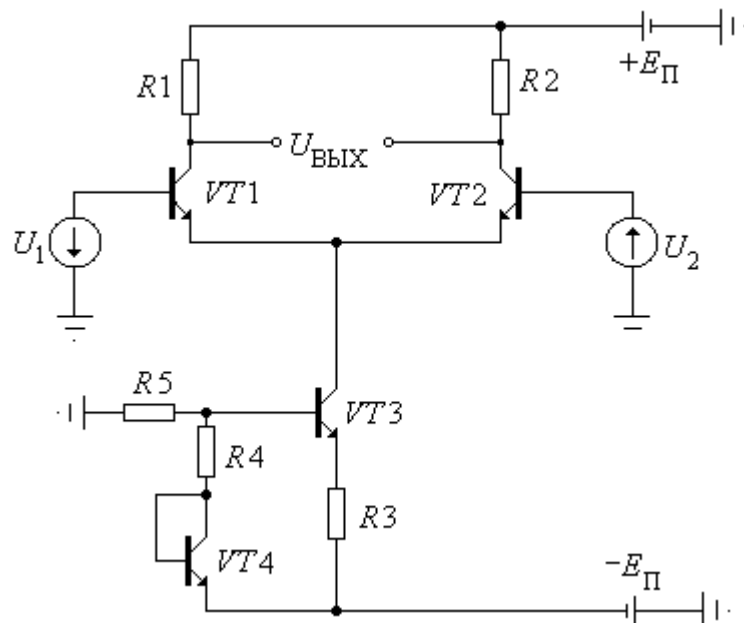
Подавлению дрейфа способствует также действие отрицательной обратной связи (ООС) по постоянному току, которая уменьшает напряжение дрейфа в  $F$  раз, где  $F$  – коэффициент обратной связи. Напряжение обратной связи образуется на резисторе  $R3$  при протекании эмиттерных токов левого и правого плеча. Сумма этих токов равна удвоенному току одного плеча, что и приводит к удвоению произведения  $SR3$  в выражении для коэффициента обратной связи:

$$F = 1 + 2SR3, \quad (4.1)$$

где  $S$  – крутизна проходной характеристики.

В микросхемных ДК из-за малой площади кристалла нельзя получить большие значения сопротивления резистора и большие значения токов, а, значит, и большие значения  $S$ . Поэтому с целью увеличения  $F$  вместо резистора  $R3$

применяют схему так называемого генератора стабильного тока (ГСТ). Схема ДК с ГСТ приведена на рис. 4.2.



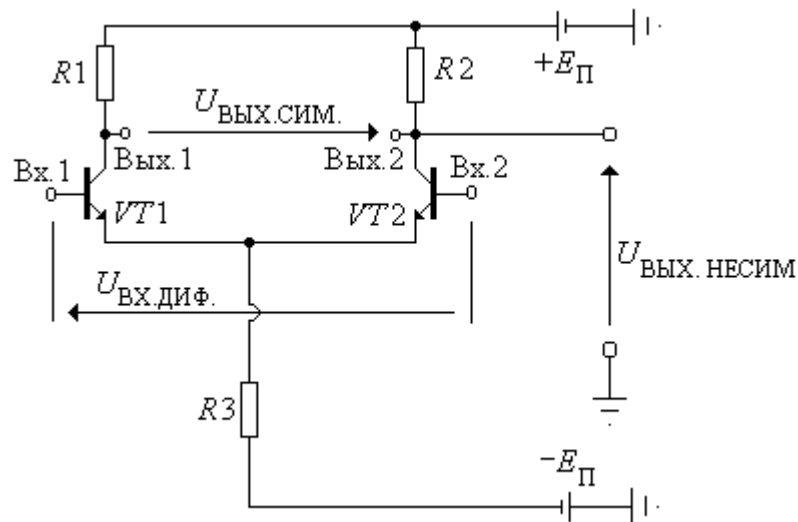
**Рис. 4.2.** Схема дифференциального каскада с генератором стабильного тока ГСТ включает в себя транзисторы  $VT3$ ,  $VT4$  и резисторы  $R3$ ,  $R4$  и  $R5$ . Транзистор  $VT4$ , включенный диодом, и резисторы устанавливают режим по постоянному току транзистора  $VT3$ . Сопротивление перехода коллектор-эмиттер транзистора  $VT3$  включено в цепь, где протекают коллекторные токи левого и правого плеча дифференциального каскада. Для постоянного тока сопротивление перехода имеет сравнительно небольшое значение, составляющее единицы кОм. В то же время для приращений коллекторного тока, в частности, вызванных дрейфом, динамическое сопротивление перехода составляет десятки кОм. Это способствует увеличению  $F$ , а, значит, уменьшению дрейфа.

### Основные свойства дифференциального каскада

#### Характеристики ДК при усилении дифференциальных сигналов

##### Коэффициент передачи

Рассмотрим случай, когда входные сигналы подаются симметрично, и выходные сигналы также снимаются симметрично (см. рис. 4.3).



**Рис. 4.3.** Схема для анализа коэффициента передачи дифференциальных сигналов

Напряжения, действующие на входе левого и правого плеча, составляют половину напряжения  $U_{ВХ.ДИФ}$  и противофазны. Так как действующие напряжения равны и противофазны, то коллекторные токи, ими вызванные, тоже равны и противофазны и, следовательно, компенсируются при протекании через резистор  $R3$ . Таким образом, отрицательная обратная связь при действии дифференциальных сигналов отсутствует. В таком случае правомерно считать, что каждое плечо работает как каскад ОЭ, и использовать при выводе соотношения для коэффициента передачи по дифференциальному сигналу выражения, относящиеся к каскаду ОЭ. Обозначим выходное напряжение, снимаемое между коллекторами, как  $U_{ВЫХ.ДИФ}(j\omega)$ . Его можно представить в виде:

$$U_{ВЫХ.ДИФ}(j\omega) = U_{ВЫХ.1}(j\omega) - U_{ВЫХ.2}(j\omega). \quad (4.2)$$

Для напряжений  $U_{ВЫХ.1}(j\omega)$  и  $U_{ВЫХ.2}(j\omega)$  можно записать следующие выражения:

$$\begin{aligned} U_{ВЫХ1}(j\omega) &= \frac{U_{ВХ.ДИФ}(j\omega)}{2} \cdot K_{ОЭ}(j\omega), \\ U_{ВЫХ2}(j\omega) &= -\frac{U_{ВХ.ДИФ}(j\omega)}{2} \cdot K_{ОЭ}(j\omega), \end{aligned} \quad (4.3)$$

где  $K_{ОЭ}(j\omega)$  – комплексный коэффициент передачи каскада ОЭ в области средних и верхних частот.

Подставляя (4.3) в (4.2), получим:

$$U_{\text{ВЫХ.ДИФ}}(j\omega) = U_{\text{ВХ.ДИФ}}(j\omega) \cdot K_{\text{ОЭ}}(j\omega),$$

откуда для коэффициента передачи ДК по дифференциальному сигналу найдем следующее выражение:

$$K_{\text{ДИФ}}(j\omega) = U_{\text{ВЫХ.ДИФ}}(j\omega) / U_{\text{ВХ.ДИФ}}(j\omega) = K_{\text{ОЭ}}(j\omega). \quad (4.4)$$

Таким образом, при усилении дифференциального сигнала ДК имеет точно такой же коэффициент передачи, такие же АЧХ и ФЧХ, как и каскад ОЭ.

В области средних частот коэффициент передачи  $K_{0,\text{ДИФ}}$  запишется в виде:

$$K_{0,\text{ДИФ}} = K_{0,\text{ОЭ}} = \frac{S}{g_{\text{НЭ}}} = \frac{S}{g_{22} + 1/R} \cong SR, \quad (4.5)$$

где  $K_{0,\text{ОЭ}}$  – коэффициент передачи каскада ОЭ в области средних частот,  $R = R1 = R2$  – сопротивления в коллекторной цепи левого или правого плеча,

$g_{\text{НЭ}}$  – суммарная проводимость нагрузки одного плеча ДК,

$g_{22}$  – выходная проводимость транзистора в схеме ОЭ.

### **Входное сопротивление ДК при усилении дифференциального сигнала**

При симметричной подаче дифференциального сигнала входные сопротивления левого и правого плеча оказываются включенными последовательно.

Следовательно, входное комплексное сопротивление ДК при усилении дифференциального сигнала равно удвоенному входному сопротивлению каскада ОЭ:

$$Z_{\text{ВХ.ДИФ}} = 2/Y_{\text{ВХ.ОЭ}}. \quad (4.6)$$

### **Характеристики ДК при усилении синфазных сигналов**

#### **Коэффициент передачи**

Анализ характеристик проведем с использованием схемы, изображенной на рис. 4.4.

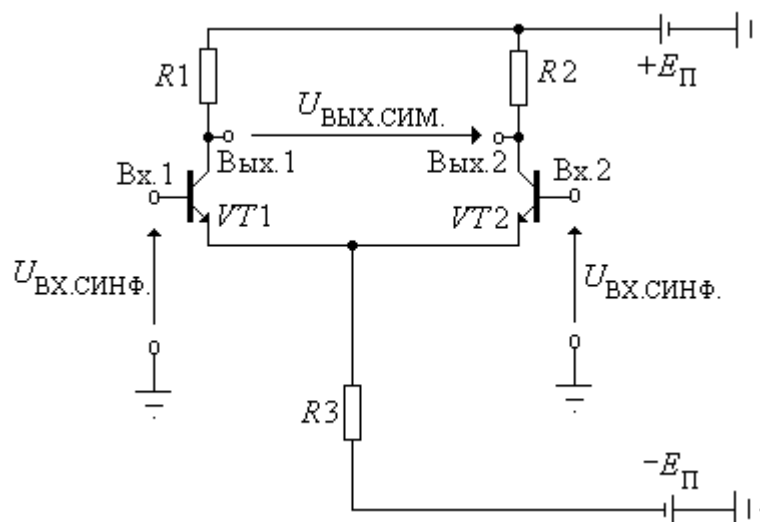


Рис. 4.4. Схема для анализа характеристик ДК при усилении синфазных сигналов

Напряжения, действующие на входе левого и правого плеча, являются синфазными. Съем выходного сигнала осуществляется симметрично – между коллекторами.

При синфазности входных напряжений коллекторные токи, ими вызванные, тоже синфазны и, следовательно, по эмиттерному резистору  $R3$  протекает ток, равный удвоенному эмиттерному току одного плеча. В результате на резисторе  $R3$  образуется напряжение отрицательной обратной связи. Обратная связь уменьшает коэффициент усиления.

Коэффициент передачи для синфазного сигнала определим как отношение разности выходных напряжений правого и левого плеча к входному напряжению:

$$K_{\text{СИНФ.}} = \frac{U_{\text{ВЫХ.2}} - U_{\text{ВЫХ.1}}}{U_{\text{ВХ.СИНФ.}}} \quad (4.7)$$

Запишем выражения для выходных напряжений  $U_{\text{ВЫХ.1}}$  и  $U_{\text{ВЫХ.2}}$  левого и правого плеча. Для простоты рассмотрим только область средних частот, где частотная зависимость коэффициента передачи отсутствует:

$$U_{\text{ВЫХ.1}} = U_{\text{ВХ.СИНФ.}} \cdot \frac{K_{0.0Э}}{F}; \quad U_{\text{ВЫХ.2}} = U_{\text{ВХ.СИНФ.}} \cdot \frac{K_{0.0Э} + \Delta K}{F} \quad (4.8)$$

В (4.8) обозначено:  $K_{0.0Э}$  – коэффициент передачи левого плеча в отсутствие отрицательной обратной связи, или, как показано выше, это коэффициент передачи левого плеча при усилении дифференциального сигнала, равный



коэффициенту передачи схемы ОЭ на средних частотах;  $F$  – коэффициент обратной связи:  $F = 1 + 2SR_3$ ,  $S$  – крутизна проходной характеристики транзистора;  $\Delta K$  – значение абсолютной разности коэффициентов передачи левого и правого плеча, которая обусловлена неидентичностью транзисторов и неравенством сопротивлений коллекторных резисторов.

Подставляя (4.8) в (4.7), для коэффициента передачи ДК в области средних частот при усилении синфазных сигналов получим следующее выражение:

$$K_{\text{Синф}} = \Delta K / F. \quad (4.9)$$

Значение  $\Delta K$  может составлять несколько единиц, значение  $F$  много больше единицы:  $F \gg 1$ . Таким образом, ДК эффективно подавляет синфазный сигнал, в частности, дрейф нуля. Для количественной оценки подавления используют, как отмечалось выше, коэффициент ослабления синфазной помехи  $N$

$$N = K_{\text{Диф}} / K_{\text{Синф}} = K_{\text{ОЭ}} / (\Delta K / F) = F (K_{\text{ОЭ}} / \Delta K). \quad (4.10)$$

### **Входное сопротивление ДК при усилении синфазного сигнала**

Вследствие действия отрицательной обратной связи входное сопротивление ДК при усилении синфазных сигналов в  $F$  раз больше, по каждому входу, чем входное сопротивление каскада ОЭ и выражается в виде:

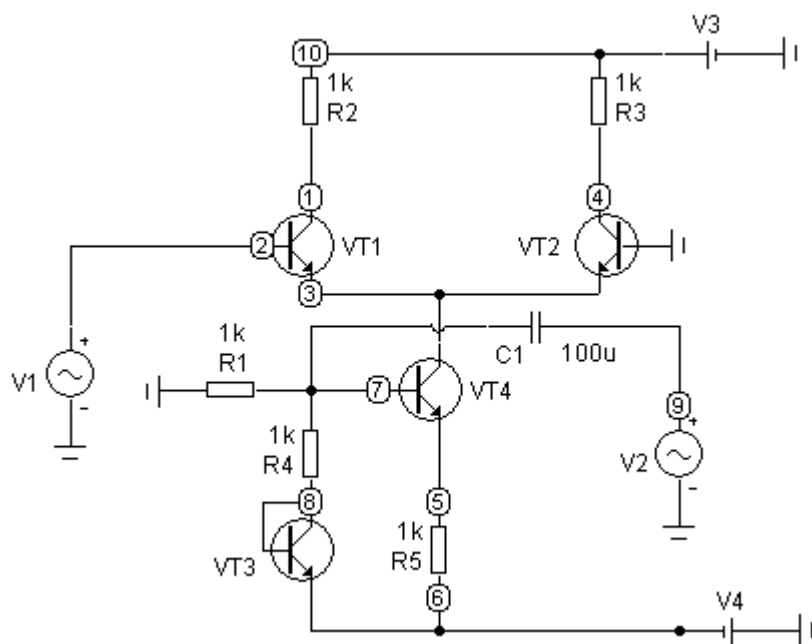
$$Z_{\text{Вх.Синф.}} = F / Y_{\text{Вх.ОЭ}} \quad (4.11)$$

## **4.2. Использование дифференциальных усилительных каскадов в режиме регулируемого усиления и в перемножителях**

### **Дифференциальный каскад с токозадающим транзистором как основа построения функциональных устройств**

При изложении материала в разделе 4.1 было отмечено, что включение в схему дифференциального каскада генератора стабильного тока (ГСТ) с токозадающим транзистором позволяет существенно ослабить дрейф нуля и обеспечить стабилизацию коллекторного тока при изменении температуры.

Рассмотрим, как осуществляется такая стабилизация. Для этого обратимся к рис. 4.5.



**Рис. 4.5. Схема для анализа работы ДК с токозадающим транзистором**

При отсутствии ГСТ повышение температуры влечет за собой увеличение коллекторных токов транзисторов  $VT1$  и  $VT2$ , а это приводит к изменению параметров транзисторов и изменению характеристик ДК. При введении в ДК генератора стабильного тока повышение температуры приводит к уменьшению сопротивления транзистора  $VT3$ , включенного диодом, уменьшению напряжения на базе токозадающего транзистора  $VT4$  и, как следствие, уменьшению коллекторных токов транзисторов  $VT1$  и  $VT2$ , т.е. к стабилизации этих токов.

Регулировка коллекторных токов путем изменения напряжения на базе токозадающего транзистора позволяет управлять крутизной проходной характеристики  $S$  транзисторов  $VT1$  и  $VT2$ . Это обстоятельство используется при реализации на базе ДК функциональных устройств, таких, как амплитудный модулятор и аналоговый перемножитель.

### **Амплитудный модулятор на базе ДК с токозадающим транзистором**

Амплитудный модулятор можно реализовать по схеме, приведенной на рис. 4.5.

На базу транзистора  $VT1$  (узел 2) подается колебание несущей частоты

$$u_H(t) = U_H \sin \omega_H t \quad (4.12)$$

На базу токозадающего транзистора  $VT4$  подается модулирующее напряжение

$$u_M(t) = U_M \sin \omega_M t \quad (4.13)$$

При этом на базе токозадающего транзистора  $VT4$  действуют два напряжения: постоянное напряжение рабочей точки  $U_{02}$  и напряжение  $u_m(t)$ . Постоянное напряжение  $U_{02}$  определяет значение крутизны  $S_0$  при отсутствии напряжения  $u_m(t)$ . При воздействии напряжения  $u_m(t)$  возникает переменная составляющая крутизны. Результирующая крутизна определяется выражением:

$$S(t) = S_0 + \Delta S \cdot \sin \omega_m t \quad (4.14)$$

Изменения коллекторного тока через транзисторы  $VT1$  и  $VT2$  зависят от напряжения несущей частоты  $u_n(t)$  и крутизны  $S(t)$ , и определяются выражением:

$$\begin{aligned} I_K(t) &= S(t) \cdot u_n(t) = (S_0 + \Delta S \cdot \sin \omega_m t) \cdot U_H \sin \omega_n t = \\ &= S_0 U_H \cdot \left(1 + \frac{\Delta S}{S_0} \sin \omega_m t\right) \cdot \sin \omega_n t = I_0 (1 + m \sin \omega_m t) \cdot \sin \omega_n t \end{aligned} \quad (4.15)$$

Из (4.15) следует, что коллекторный ток представляет собой амплитудно-модулированное колебание. Для исключения постоянной составляющей в выходном АМ-колебании, это колебание снимается между коллекторами транзисторов  $VT1$  и  $VT2$ .

На рис. 4.6 приведена эюра АМ-колебания, полученная в результате моделирования схемы рис. 4.5 при использовании программы МС7.

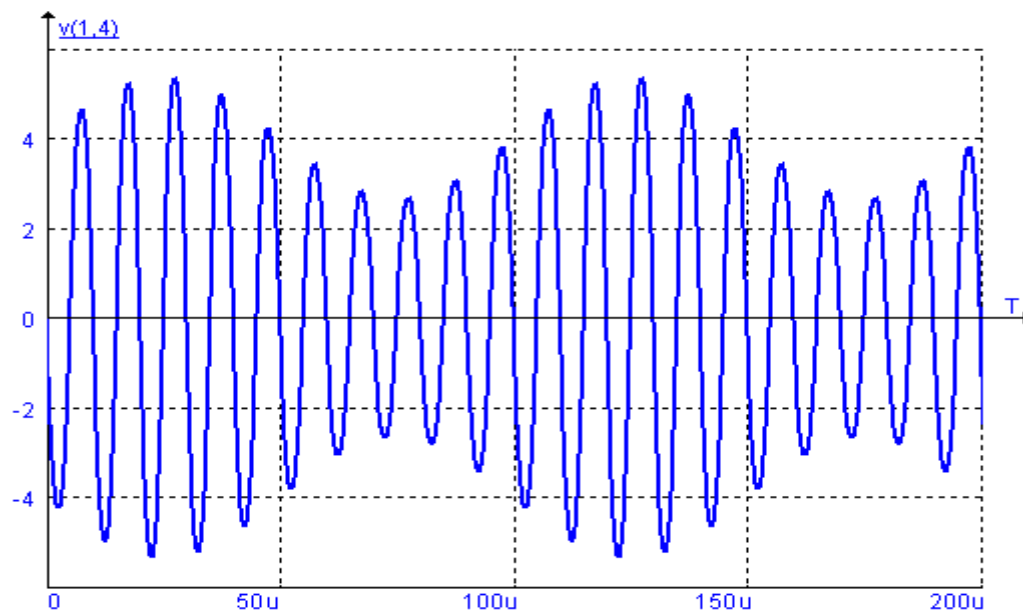


Рис. 4.6. Эюра АМ-колебания на выходе ДК с токозадающим транзистором

## **Аналоговый перемножитель на базе ДК**

Рассмотренный выше амплитудный модулятор выполняет операцию перемножения двух аналоговых сигналов. Осуществление амплитудной модуляции является одним из применений аналогового перемножителя. На основе аналогового перемножителя могут быть реализованы другие функциональные устройства: оптимальные преобразователи частоты (ПЧ), ПЧ с подавлением зеркального канала, квадратурные преобразователи, умножители частоты, синхронные детекторы, амплитудные регуляторы, стробкаскады, электронные ключи, модуляторы, демодуляторы (амплитудные, частотные и фазовые), квадратурные фильтры и др. Как указано в пособии [2], для построения высококачественного аналогового перемножителя следует использовать транзисторный квартет. Там же приведены результаты анализа работы такого квартета.

### ***Контрольные вопросы***

1. Какова область использования дифференциальных каскадов (ДК)? Что такое дрейф нуля?
2. Изобразите упрощенную принципиальную схему ДК. Какие сигналы называют дифференциальными, а какие синфазными?
3. Используя упрощенную схему ДК, объясните, как осуществляется усиление дифференциальных сигналов и подавление синфазных сигналов.
4. Каково назначение генератора стабильного тока в схеме ДК?
5. Выведите выражение для коэффициента передачи дифференциального каскада при усилении синфазных и дифференциальных сигналов.
6. Дайте определение коэффициента ослабления синфазного сигнала. От каких параметров зависит значение этого коэффициента?
7. Изобразите схему амплитудного модулятора на базе ДК. Благодаря чему осуществляется амплитудная модуляция при использовании ДК?
8. Объясните работу ДК в качестве аналогового перемножителя.