

Аналоговые перемножители напряжений

Устройство и принцип действия. Аналоговыми перемножителями напряжений называют интегральные микросхемы, предназначенные для выполнения операции перемножения двух сигналов и выдачи результата перемножения в форме напряжения

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_x U_y}{U_r} = K_{\Pi} U_x U_y, \quad (10.1)$$

где $U_r = K_{\Pi}^{-1}$ — масштабирующее напряжение.

Особенностью операции перемножения является то, что полярность выходного напряжения определяется полярностями двух входных напряжений, каждое из которых может быть как положительным, так и отрицательным. Если входные и выходные сигналы могут быть как положительными, так и отрицательными, и полярности их согласованы, то такой перемножитель называется четырехквadrантным. Графическая зависимость выходного напряжения от входных напряжений U_x и U_y приведена на рис. 10.1 а. Если выходной сигнал изменяет полярность при изменении полярности только одного входного сигнала, то умножитель называют двухквadrантным. Если все сигналы могут быть только однополярными, то умножитель называют одноквadrантным.

Масштабирующее напряжение U_r обычно является постоянным (хотя и с подстройкой), но в большинстве микросхем перемножителей значением этого напряжения можно управлять, подавая ток или напряжение управления на третий вход. Поскольку в аналоговых перемножителях выходное напряжение зависит от двух входных напряжений, то его характеристики могут сложным образом зависеть от этих напряжений. В реальном перемножителе выходное напряжение оказывается пропорциональным не только произведению входных сигналов, но и самим входным сигналам, поэтому для его оценки обычно пользуются формулой

$$U_{\text{вых}} = K_{\Pi} U_x U_y + K_x U_x + K_y U_y + K_0, \quad (10.2)$$

где K_{Π} — постоянный коэффициент передачи умножителя, K_x, K_y — коэффициенты, определяющие смещение, зависящее от уровня входных сигналов U_x и U_y , $K_0 = U_{\text{см}}$ — смещение нулевого уровня.

Для получения высокой точности перемножения сигналов в микросхемах перемножителей вводятся по крайней мере четыре регулировки, позволяющие установить требуемый коэффициент передачи K_{Π} и устранить прямое прохождение сигналов U_x и U_y . Кроме этого, вводится регулировка смещения нулевого уровня. В большинстве случаев масштабирующий коэффициент перемножителя выбирают таким, чтобы выполнялось соотношение

$$U_{\text{вых}} = U_x U_y / 10, \quad (10.3)$$

т. е. $K_{\Pi} = 0,1 \text{ В}^{-1}$. Это условие использовано при построении графика рис. 10.1.

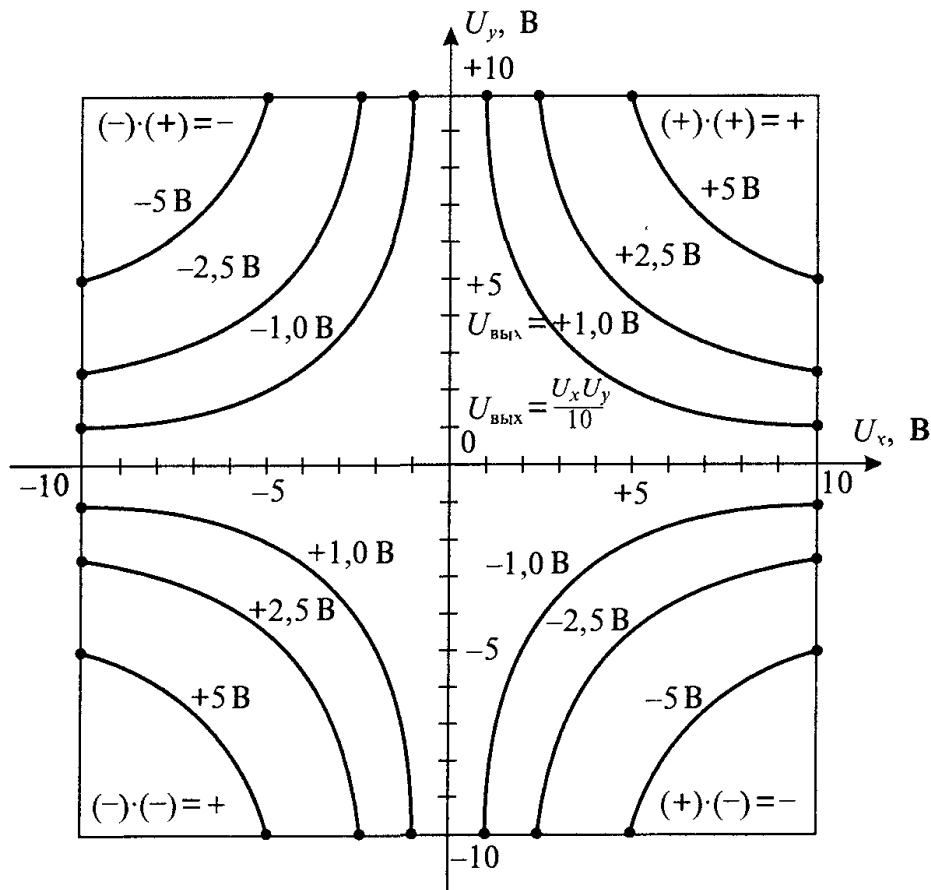


Рис. 10.1. Передаточные характеристики перемножителя напряжений

Разработано несколько способов построения аналоговых перемножителей напряжения: логарифмирующие, квадратирующие, с широтноимпульсной модуляцией и др., однако в интегральных микросхемах преимущественно применяется метод построения перемножителей на принципе переменной крутизны. Базовая схема перемножителя с переменной крутизной приведена на рис. 10.2 а, а его упрощенная структурная схема изображена на рис. 10.2 б.

Этот метод основан на зависимости крутизны биполярного транзистора от тока эмиттера. С этой целью в схему введен дифференциальный каскад, на вход которого подается сигнал U_x . Выходное напряжение дифференциального каскада пропорционально произведению крутизны S на входное напряжение U_x :

$$U_{\text{вых}} = S R_n U_x, \quad (10.4)$$

где R_n — сопротивление нагрузки.

Для регулирования крутизны дифференциального каскада в схему введен преобразователь напряжения U_y в ток i_3 на транзисторе ТЗ. При достаточно большом значении сопротивления R_3 ток эмиттера транзистора ТЗ можно определить по формуле

$$i_3 = U_y / R_3.$$

В свою очередь, крутизна биполярного транзистора, используемого в схеме дифференциального каскада, определяется из уравнения Эберса — Молла

$$I_k = I_s (e^{U_{бэ}/\varphi_T} - 1). \quad (10.5)$$

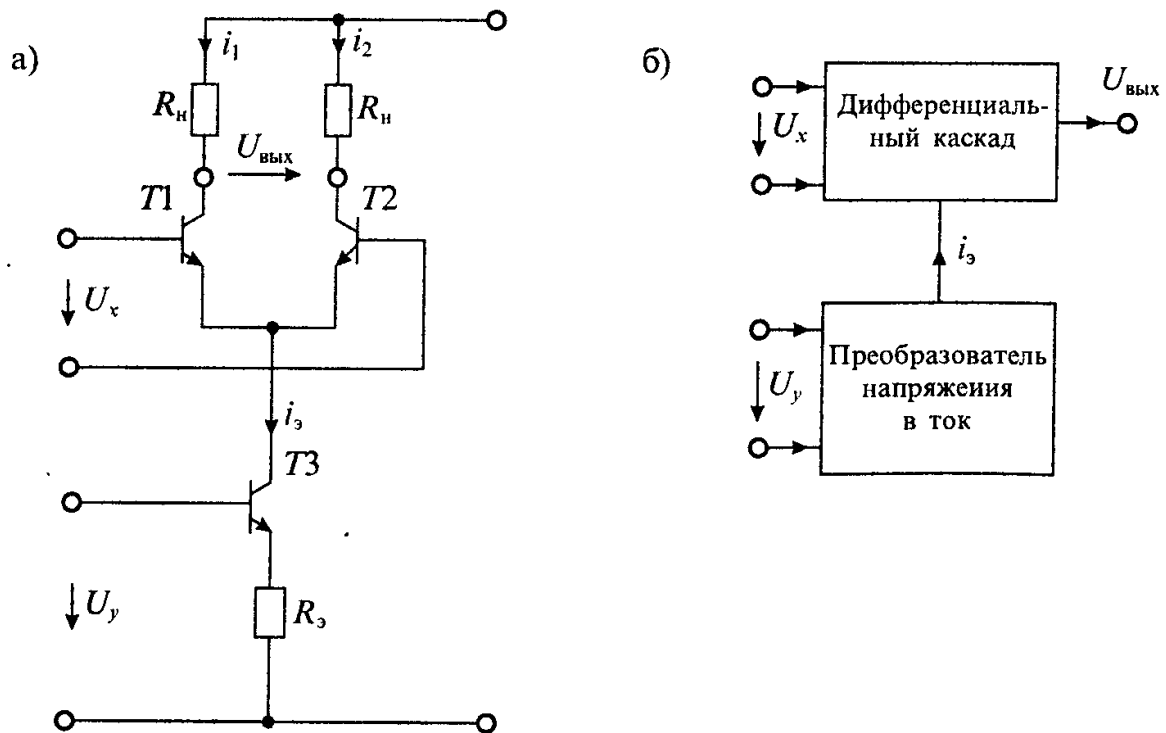


Рис. 10.2. Упрощенная схема перемножителя с переменной крутизной: принципиальная (а) и структурная (б)

При выполнении условия $U_{б3} > \varphi_T$ ток коллектора

$$i_k \approx i_3 = I_s e^{U_{б3}/\varphi_T},$$

откуда находим крутизну транзистора в виде

$$S = \frac{\partial i_3}{\partial U_{б3}} = I_s e^{U_{б3}/\varphi_T} \cdot \frac{1}{\varphi_T} = \frac{i_3}{\varphi_T}. \quad (10.6)$$

Подставляя значение крутизны и тока эмиттера, найдем выходное напряжение перемножителя

$$U_{вых} = \frac{I_3}{\varphi_T} R_n U_x = \frac{R_n}{R_3 \varphi_T} U_x U_y = K_n U_x U_y, \quad (10.7)$$

где $K_n = R_n / (R_3 \varphi_T)$ — коэффициент передачи перемножителя.

Приведенная базовая схема перемножителя имеет ряд существенных недостатков:

- входной дифференциальный каскад имеет симметричный выход, не позволяющий применять заземленную нагрузку;
- преобразователь напряжения U_y в ток i_3 имеет несимметричный вход и, следовательно, на вход U_y можно подавать сигнал только одной полярности, т. е. преобразователь может быть только двухквadrантным;
- входной сигнал U_x связан с коллекторным током и напряжением эмиттерного перехода экспоненциальной зависимостью (10.5), которая вносит нелинейность, даже при очень малом уровне напряжения U_x .

Для устранения этих недостатков схему перемножителя усложняют. Для создания симметричного входа по сигналу U_y базовую схему перемножителя дополняют вторым дифференциальным каскадом, входы которого включены параллельно входам первого. Коллекторные выходы второго каскада соединены перекрестно с коллекторными выходами первого каскада, как показано на рис. 10.3. Благодаря симметричному входу сигнала U_y усовершенствованный перемножитель может работать во всех четырех квадрантах, т. е. становится четырехквадрантным.

Для схемы четырехквадрантного перемножителя можно записать уравнение, определяющее выходное напряжение:

$$(i_1 + i_3)R_H - (i_2 + i_4)R_H = U_{\text{вых}}. \quad (10.8)$$

После перегруппировки членов выражения (10.8) получим:

$$(i_1 - i_2)R_H - (i_3 + i_4)R_H = U_{\text{вых}}. \quad (10.9)$$

Разностные токи пропорциональны входному напряжению U_x и крутизне дифференциальных каскадов S_1 или S_2 соответственно

$$\begin{cases} i_1 - i_2 = U_x S_1 = U_x i_{31} / \varphi_T, \\ i_3 - i_4 = -U_x S_2 = -U_x i_{32} / \varphi_T. \end{cases} \quad (10.10)$$

После подстановки значений разностных токов в уравнение (10.9) запишем уравнение для выходного напряжения в виде

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_x (i_{31} - i_{32})}{\varphi_T} R_H, \quad (10.11)$$

где $i_{31} - i_{32} = \Delta i_3$ — разность эмиттерных токов двух дифференциальных каскадов.

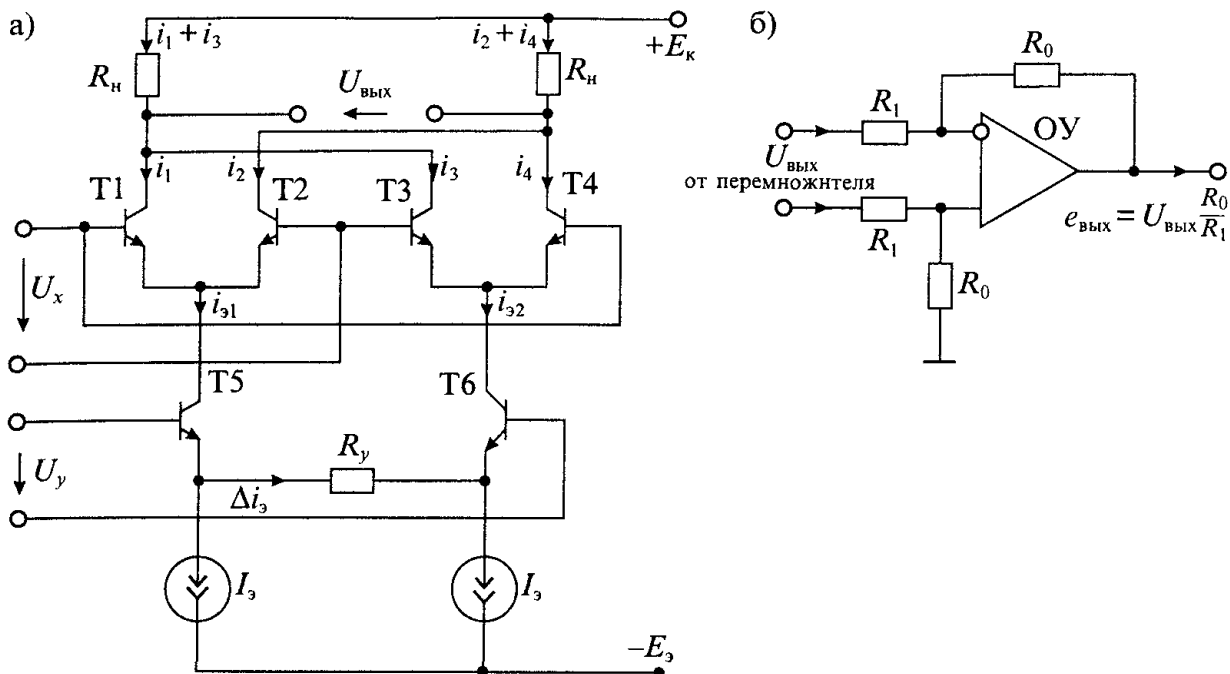


Рис. 10.3. Упрощенная схема четырехквадрантного перемножителя напряжений (а) и преобразователь симметричного выходного сигнала в несимметричный (б)

Пренебрегая падением напряжений база-эмиттер транзисторов T_5 и T_6 найдем значение разностных токов эмиттеров в виде

$$\Delta i_3 = U_y / R_y. \quad (10.12)$$

Подставив значение (10.12) в формуле (10.11), получим окончательное значение выходного напряжения перемножителя

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_x U_y R_n}{\phi_T R_y} = K_n U_x U_y, \quad (10.13)$$

откуда следует, что $K_n = R_n / (R_y \phi_T)$.

Преобразование симметричного выхода перемножителя в несимметричный в специализированных микросхемах выполняют при помощи дифференциального усилителя на ОУ. Схема подключения такого усилителя приведена на рис. 10.3 б. Выходной сигнал перемножителя поступает на симметричный вход ОУ. Коэффициент передачи такого усилителя равен отношению сопротивлений R_0 / R_1 .

Для расширения диапазона входных сигналов и исключения нелинейности, связанной с экспоненциальной зависимостью коллекторных токов от напряжения база-эмиттер, в схему перемножителя вводят каскад предварительного преобразования напряжения U'_x . Схема такого каскада, в котором для логарифмирования входного сигнала U'_x используется дифференциальный усилитель с диодной нагрузкой, приведена на рис. 10.4. По структуре эта схема идентична схеме преобразования сигнала U_y , приведенной на рис. 10.3 а.

Для схемы, приведенной на рис. 10.4, можно записать следующие уравнения, связывающие напряжение на входе U'_x и выходе U_d каскада

$$\frac{U'_x}{R_x} = i_x = I_s e^{U_d / \phi_T},$$

откуда найдем напряжение на выходе логарифмического преобразователя:

$$U_x = U_d = \phi_T \ln \frac{i_x}{I_s} = \phi_T \ln \frac{U'_x}{R_x I_s}. \quad (10.14)$$

Благодаря логарифмическому преобразованию происходит компрессия (сжатие) входного сигнала U'_x в сравнительно небольшое изменение выходного напряжения U_x , которое подается на вход перемножителя. По сути дела аналогичное преобразование выполняется и в канале напряжения U_y , только роль диодных нагрузок выполняют переходы база-эмиттер транзисторов.

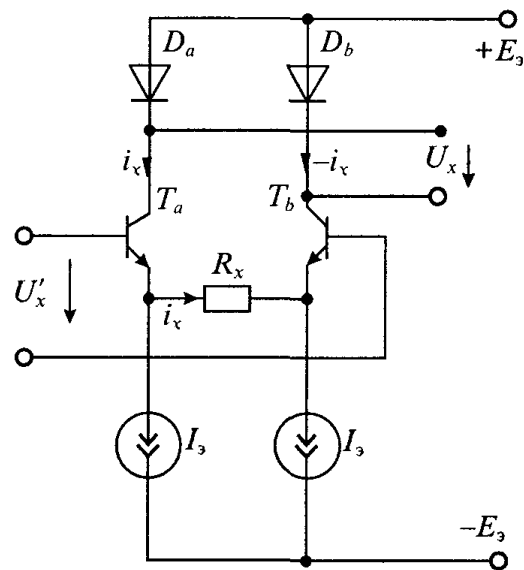


Рис. 10.4. Схема входного логарифмического преобразователя напряжения для перемножителя напряжений

Основными параметрами перемножителей и напряжений являются:

- погрешность перемножения, которая определяется следующими соотношениями:
 - абсолютная погрешность $\Delta_{\Pi} = U_{\text{вых}} - (U_x U_y) / 10$,
 - относительная погрешность $\delta_{\Pi} = \Delta_{\Pi} / 10 \cdot 100\% = 10 \Delta_{\Pi} \%$;
- нелинейность перемножения — максимальная разность между фактическим и теоретическим значениями выходного сигнала;
- напряжение смещения нулевого уровня — напряжение на выходе перемножителя при нулевом значении напряжений на входах $U_x = U_y = 0$;
- входные токи перемножителя $I_{\text{вх } x}$ и $I_{\text{вх } y}$;
- полоса пропускания при малом уровне сигнала на одном из входов и постоянном напряжении — на другом;
- максимальное значение выходного напряжения $U_{\text{вых макс}}$;
- максимальный выходной ток $I_{\text{вых макс}}$.

Кроме перечисленных иногда приводятся дополнительные параметры перемножителей: скорость нарастания выходного напряжения, фазовый сдвиг при изменении частоты входных сигналов, входное сопротивление и выходное сопротивление.

Погрешность перемножения является результирующей и зависит от всех частных погрешностей: погрешности, вызванной смещением нулевого уровня; погрешности пролезания сигналов U_x и U_y ; нелинейности характеристики перемножения и погрешности масштабирующего коэффициента K_{Π} . Напряжение смещения нулевого уровня, приводимое в справочных данных, указывает максимальное значение напряжения смещения при условии, что входы X и Y соединены с общим выводом источника питания ($U_x = U_y = 0$) без внешней подстройки. С помощью внешней подстройки смещение можно снизить до нулевого значения, однако с изменением температуры оно будет изменяться.

Масштабирующий коэффициент K_{Π} представляет собой статический параметр и в большинстве перемножителей его значение принято равным $0,1 \text{ В}^{-1}$. Однако в ряде случаев применяются масштабирующие коэффициенты, отличные от этого значения. В некоторых случаях имеется даже возможность подстройки масштабирующего коэффициента. Погрешность масштабирующего коэффициента может быть сведена к нулю подстройкой в какой-либо точке диапазона. Подстроить значение масштабирующего коэффициента во всем диапазоне невозможно из-за нелинейности.

Погрешность нелинейности не поддается уменьшению. Обычно ее оценивают по максимальному отклонению от среднего значения масштабирующего коэффициента.

Погрешность, связанная с прямым прохождением сигнала, состоит из двух частей — линейной и нелинейной. Линейная часть является произведением напряжения на сигнальном входе и напряжения смещения нуля. Ее можно скомпенсировать до нуля введением равного по значению и противоположного по знаку напряжения коррекции на подстраиваемом входе. Нелинейная часть обусловлена нелинейностью схемы перемножителя и ее нельзя убрать подстройкой смещения.

Динамика перемножителя характеризуется полосой пропускания по уровню 0,7 при малом сигнале (т. е. по уменьшению коэффициента передачи на 3 дБ). Понятие «малый» сигнал означает, что уровень выходного сигнала не превышает 10% от максимального значения выходного напряжения. Полоса пропускания существенно образом зависит от сопротивлений нагрузки перемножителя. В связи с этим перемножители, которые предназначены для работы в широкой полосе частот, имеют открытый коллекторный выход, к которому подключается внешнее сопротивление нагрузки. Так, например, для перемножителя МС1495 при сопротивлении нагрузки 11 кОм полоса пропускания равна 3 МГц, а при сопротивлении 50 Ом полоса пропускания расширяется до 80 МГц.

Классификация и типы перемножителей. Перемножители напряжений можно разделить по следующим признакам: принципу действия, полосе частот и погрешности перемножения. По принципу действия перемножители можно разделить на три основные группы: логарифмические, с широтно-импульсной модуляцией и с переменной крутизной. Первые два типа промышленностью не выпускаются. Имеются только базовые узлы логарифматоров и широтно-импульсных модуляторов, однако законченных перемножителей нет. Серийно выпускаются только перемножители на принципе управления крутизной дифференциального каскада, рассмотренные выше.

По погрешности перемножения выпускаемые перемножители можно разделить на группы малой, средней и высокой точности. Перемножители малой точности являются самыми простыми — они не содержат входного логарифматора и выходного ОУ. Обычно такие перемножители называют балансными модуляторами и используют для преобразования частоты сигналов. Погрешность балансных модуляторов обычно не нормируется. Такие перемножители имеют открытый коллекторный выход, который допускает подключение резистивной или индуктивной нагрузки (например, колебательного контура). В табл. 10.1 приведены основные параметры некоторых типов балансных модуляторов, используемых в различных электронных схемах: селекторах каналов, радиоприемниках, делителях и умножителях частоты, частотных и фазовых детекторах. Система обозначений допускает использовать для таких микросхем два варианта обозначения: группа МА — модуляторы амплитудные и группа ПС — перемножители и преобразователи частоты.

Перемножители средней точности обычно содержат входной логарифматор, позволяющий увеличить входной сигнал до 10 В. Выходной операционный усилитель и нагрузочные резисторы в таких перемножителях не входят в состав микросхемы. Погрешность перемножения таких перемножителей больше 1%.

Основные параметры микросхем балансных модуляторов

Параметр	Тип микросхемы			
	К174ПС1	К174ПС4	К526ПС1	К140МА1
Полоса рабочих частот, МГц	200,0	1000,0	80	2
Входной сигнал, мВ	100,0	25,0	100	100
Крутизна преобразования, мА/В (Коэффициент передачи, дБ)	4,5	4,5	(14)	(10)

Перемножители высокой точности имеют в своем составе все элементы для построения схемы перемножения: входной логарифматор, выходной операционный усилитель и стабилизатор напряжений питания отдельных узлов микросхемы. Нагрузочные резисторы и резисторы обратной связи операционных усилителей в таких перемножителях выполняются с высокой точностью с помощью лазерной подгонки. Входы высокоточных перемножителей могут быть симметричными (дифференциальными) или несимметричными. Погрешность перемножения в таких микросхемах обычно не превышает 1%. В табл. 10.2 приведены основные параметры перемножителей средней и высокой точности.

Таблица 10.2

Основные параметры микросхем перемножителей напряжений

Параметр	Тип микросхемы			
	K252PC1 (MC1495)	K252PC2	K525PC3	MC1494 (Motorola)
Погрешность перемножения, %	$\pm 2,0$	$\pm 1,0$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$
Напряжение смещения, мВ	50,0	80,0	30,0	200,0
Входной ток, мкА	8,0	2,0	2,0	1,0
Максимальное входное напряжение, В	$\pm 12,0$	$\pm 10,0$	$\pm 10,0$	$\pm 10,0$
Полоса пропускания при малом сигнале, МГц	1,5	1,0	1,0	1,0

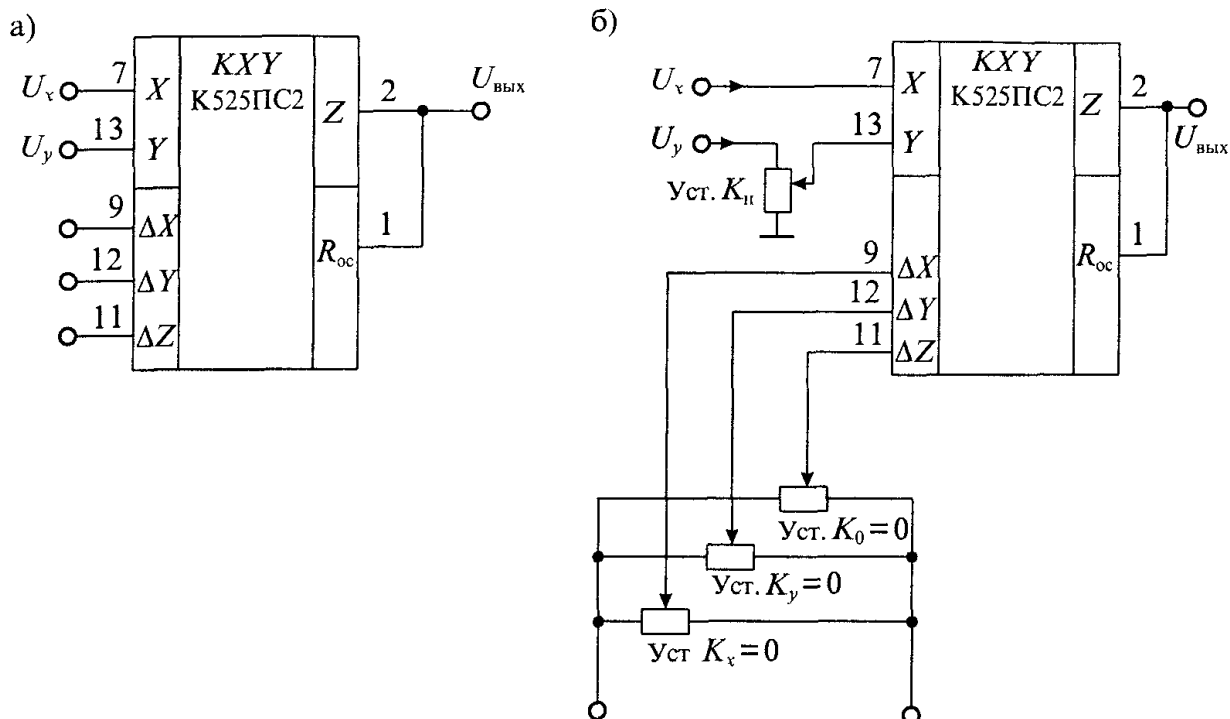


Рис. 10.5. Условное обозначение перемножителя напряжений (а) и его типовая схема включения (б)

Номинальное значение масштабного коэффициента $K_{\Pi}=0,1$ для всех микросхем, приведенных в табл. 10.2. Входное сопротивление на низкой частоте более 10 МОм. На рис. 10.5 приведено включение микросхемы аналогового перемножителя напряжений типа К525ПС2. Этот перемножитель имеет симметричные входы для сигналов U_x и U_y . Если входные сигналы несимметричные, то другие выводы входов используют для корректировки напряжения смещения нулевого уровня по каждому из входов. Выходной ОУ также имеет вывод для подачи напряжения корректировки нулевого уровня (напряжения смещения). Внутри микросхемы имеется резистор обратной связи ОУ, один вывод которого при значении $K_{\Pi}=0,1$ нужно подключить к выходу ОУ (вывод 2). При необходимости изменить масштабирующий коэффициент последовательно с этим резистором можно включить дополнительное внешнее сопротивление.

Микросхема перемножителя средней точности К525ПС1 не содержит внутреннего ОУ и нагрузочных резисторов. Поэтому при ее использовании эти элементы подключают дополнительно. На рис. 10.6 приведено типовое включение микросхемы К525ПС1 в качестве перемножителя напряжений. Кроме того, в состав микросхемы не входят сопротивления R_x и R_y , нормирующие передачи по каналам U_x и U_y . Эти сопротивления также подключаются к выводам микросхемы внешним образом. Графики передаточных характеристик перемножителей К525ПС1 и К525ПС2 приведены на рис. 10.6 б. Ввиду малой погрешности нелинейности (около 1%) на передаточных характеристиках отклонения от линейной зависимости незаметны.

Применение перемножителей. Как уже отмечалось, микросхемы перемножителей находят применение в различных электронных устройствах. Кроме этого, они входят составной частью во многие специализированные микросхемы и узлы. Столь широкое применение ИМС перемножителей обусловлено прежде всего тем, что нелинейная операция перемножения приводит к изменению спектра выходного сигнала. Так, например, если оба сигнала U_x и U_y гармонические, но с разной частотой ω_x и ω_y , то

$$U_x = U_{mx} \cdot \cos(\omega_x t), \quad U_y = U_{my} \cdot \cos(\omega_y t). \quad (10.15)$$

В результате перемножения этих сигналов на выходе перемножителя образуются два сигнала, один из которых имеет суммарную, а другой — разностную частоту

$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{K_{\Pi}}{2} U_{mx} U_{my} [\cos(\omega_x - \omega_y) + \cos(\omega_x + \omega_y)]. \quad (10.16)$$

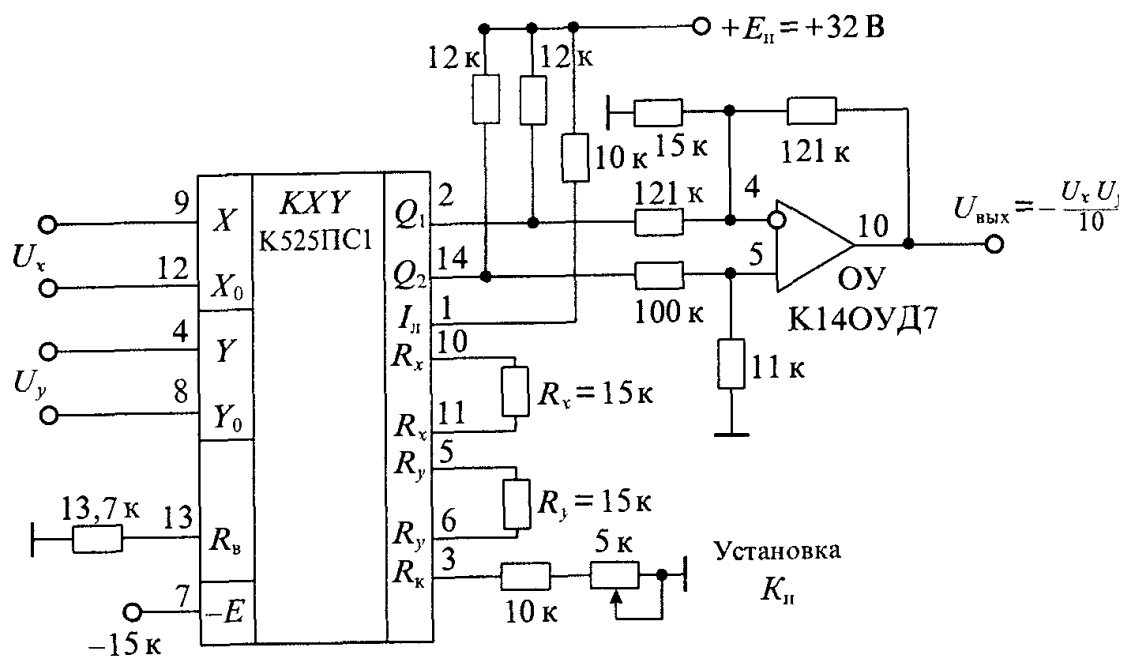
Амплитуды выходных сигналов одинаковы и равны $K_{\Pi} U_{mx} U_{my} / 2$. В то же время на выходе перемножителя отсутствуют сигналы с частотами перемножаемых сигналов. Такое преобразование двух сигналов является операцией балансной модуляции.

Если же на оба входа перемножителя подать один и тот же сигнал $U_x = U_y = U_m \cos \omega t$, то выходное напряжение перемножителя будет содержать постоянную составляющую и сигнал удвоенной частоты

$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{K_{\Pi} U_m^2}{2} (1 + \cos 2\omega t). \quad (10.17)$$

Если отфильтровать постоянную составляющую, то получается схема удвоителя частоты.

a)



б)

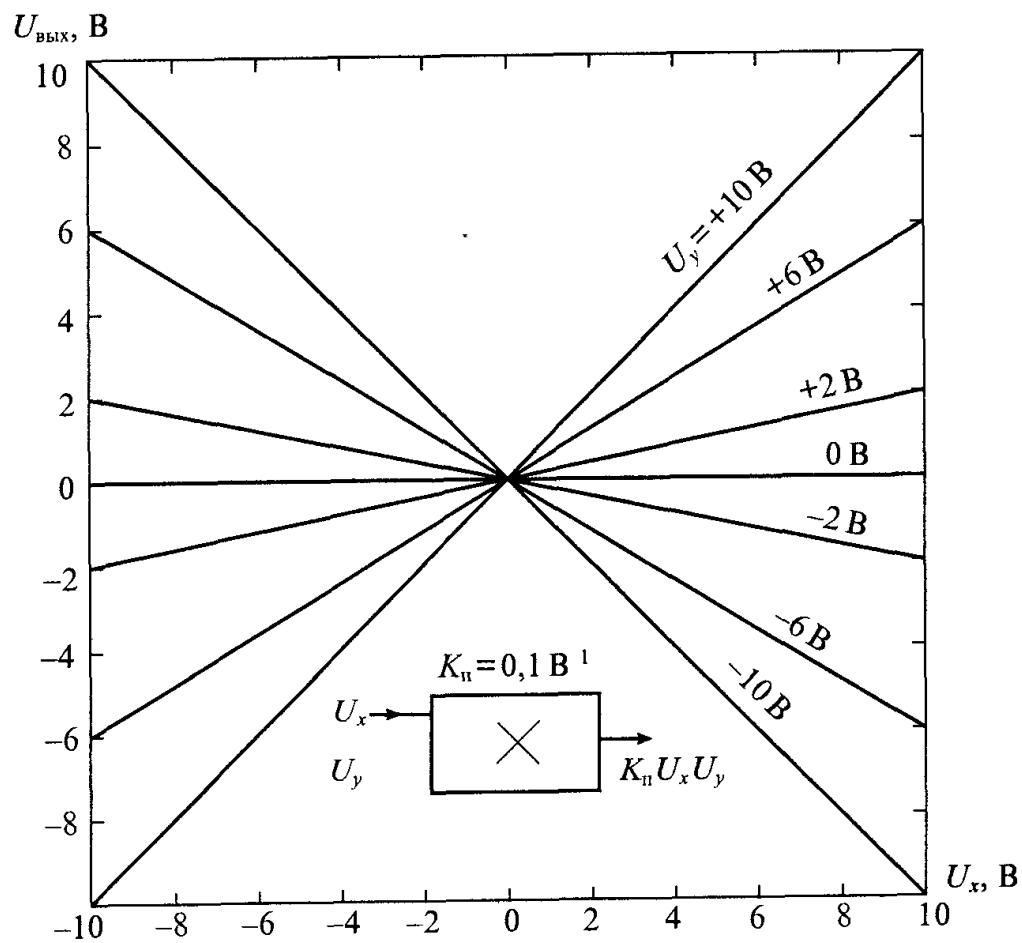


Рис 10.6. Включение микросхемы K525PC1 в качестве перемножителя напряжений (а) и ее передаточные характеристики (б)