

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Промышленная электроника»

**Л. А. Захаренко**

## **АНАЛОГОВЫЕ ПЕРЕМНОЖИТЕЛИ СИГНАЛОВ**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
по курсу «Микроэлектроника и микросхемотехника»  
для студентов специальности 1-36 04 02  
«Промышленная электроника»**

**Электронный аналог печатного издания**

**Гомель 2008**

УДК 621.382.049.77(075.8)  
ББК 32.844.1я73  
3-38

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
факультета автоматизированных информационных систем  
ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 7 от 12.03.2007 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук *А. В. Ковалев*

**Захаренко, Л. А.**

3-38 Аналоговые перемножители сигналов : лаб. практикум по курсу «Микроэлектроника и микросхемотехника» для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» / Л. А. Захаренко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2008. – 23 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-420-772-8.

Изложены общие сведения о принципах работы и способах построения аналоговых перемножителей сигналов, основные технические характеристики перемножителей, подробно рассмотрены статические и динамические параметры построения аналоговых перемножителей сигналов. Приведены необходимые схемы и формулы, поясняющие теоретический материал.

Для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника».

**УДК 621.382.049.77(075.8)  
ББК 32.844.1я73**

**ISBN 978-985-420-772-8**

© Захаренко Л. А., составление, 2008  
© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2008

## Лабораторная работа № 13

### ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ АНАЛОГОВЫХ ПЕРЕМНОЖИТЕЛЕЙ СИГНАЛОВ

**Цель работы:** научиться определять опытным путем основные статические и динамические параметры интегральных микросхем аналоговых перемножителей сигналов на примере ИМС 525ПС1.

#### *Используемое оборудование:*

- блок питания  $\pm 15\text{В}$ ;
- лабораторный макет на ИМС 525ПС1;
- осциллограф С1-82;
- генератор ГЗ-112;
- вольтметр В7-40 – 2 шт.;
- комплект проводов.

#### *Теоретическая часть*

##### **Введение**

Аналоговый перемножитель сигналов (АПС) в интегральном исполнении – универсальный элемент в ряду линейных схем, находящий широкое применение в устройствах аналоговой обработки и преобразования сигналов. Аналоговый перемножитель сигналов является вторым по массовости применения после операционного усилителя (ОУ) универсальным функциональным элементом, используемым для обработки аналоговых сигналов. К операции умножения сводятся различные нелинейные и параметрические преобразования аналоговых сигналов, такие как модуляция, управление параметрами фильтров, усилителей, генераторов, вычисление и многие другие. Это устройство с двумя входами (зачастую дифференциальными); его выходное напряжение пропорционально произведению входных напряжений  $U_X$  и  $U_Y$

$$U_{\text{ВЫХ}} = K_0 \cdot U_X \cdot U_Y. \quad (13.1)$$

В общем случае аналоговое умножение двух сигналов можно осуществить тремя способами. В зависимости от этого различают косвенное умножение, квазиумножение и прямое умножение.

Устройство, в котором выходная величина математически представляется произведением входных величин  $X$  и  $Y$ , в виде суммы постоянных и изменяющихся величин с постоянными коэффициентами, а также в виде функций таких сумм, реализует косвенное умножение.

Устройство, в котором выходная величина изменяется пропорционально произведению двух непрерывных, сильно монотонных функций, каждая из которых есть независимо изменяющиеся входные величины  $X$  и  $Y$ , реализует квазиумножение.

Устройство, в котором выходная величина изменяется пропорционально произведению входных величин  $X$  и  $Y$ , каждая из которых изменяется независимо под воздействием внешних факторов, реализует прямое умножение.

Параболические (квадратичные) и логарифмические перемножители являются наиболее типичными функциональными преобразователями, которые используют косвенное умножение. К квазиперемножителям относятся АПС с амплитудно-частотной модуляцией, с мостом Уитсона (с изменяющимися сопротивлениями в ветвях), с управляемым делителем напряжений и т. д.

Прямое умножение возможно осуществить различными методами, например на основе использования преобразователей Холла, электронно-лучевых трубок, усилителей элементов с двойным управлением, управляемых сопротивлений, управляемых делителей тока и др. Широко используется при прямом умножении амплитудно-широтная импульсная модуляция (АШИМ).

В зависимости от разрешаемой полярности входных сигналов различают одно-, двух- и четырехквadrантные перемножители. Если разрешается подача на вход сигналов  $U_X$ ,  $U_Y$  только одной полярности, то реализуется одноквadrантное перемножение. Если один из входных сигналов может иметь различную полярность, то мы имеем двухквadrантный перемножитель. И если  $U_X$  и  $U_Y$  могут быть любой полярности, то имеем четырехквadrантный перемножитель.

## **Параметры аналоговых перемножителей сигналов**

Система электрических параметров аналоговых перемножителей сигналов насчитывает более 50 наименований. Большинство параметров АПС аналогичны параметрам операционных усилителей, но имеется и ряд специфических параметров.

### **1. Статические параметры АПС**

#### *1.1. Погрешность перемножения АПС*

Основным параметром, характеризующим АПС, является погрешность перемножения. Погрешность перемножения в процентах от полной шкалы  $\varepsilon$  – это максимальная разность между фактическим и теоретическим значениями входного сигнала, приведенная к предель-

ному значению выходного напряжения, для любой пары входных напряжений постоянного тока в пределах рабочего диапазона перемножителя, предварительно настроенного на минимальную погрешность.

Погрешность перемножения определяется по формуле, %:

$$\varepsilon = \frac{U_{\text{ВЫХ}} - k \cdot U_X \cdot U_Y}{U_{\text{ВЫХ.МАКС}}} \cdot 100 \%, \quad (13.2)$$

где  $U_{\text{ВЫХ.ИЗМ}}$  – выходное напряжение АПС, измеренное вольтметром.

Таким образом, отличие выходного напряжения от теоретического значения на 100 мВ соответствует погрешности перемножения 1 %.

### *1.2. Настройка АПС на минимальную погрешность*

Настройка АПС на минимальную погрешность перемножения заключается во взаимном уравнивании статических составляющих погрешности перемножения, включающих смещение на входах  $X$  и  $Y$  (разбаланс входов), смещение на выходе (разбаланс выходного каскада) и среднее значение погрешности масштабного коэффициента. Настройка состоит из установки напряжений на балансировочных входах  $X_{\text{СМ}}$ ,  $Y_{\text{СМ}}$ ,  $Z_{\text{СМ}}$  микросхемы, компенсирующих напряжения смещения по соответствующим входам, и подборе среднего значения масштабного коэффициента.

Настройка может осуществляться двумя способами: на постоянном и на переменном токе.

При настройке на постоянном токе необходимо:

1. Подать на вход  $X$  максимальное разрешенное входное постоянное напряжение, а вход  $Y$  заземлить. Подстроечным резистором  $R_{Y_{\text{СМ}}}$  установите минимальное напряжение (по осциллографу) на выходе перемножителя.

2. Подать на вход  $Y$  максимальное разрешенное постоянное напряжение, а вход  $X$  заземлить. Подстроечным резистором  $R_{X_{\text{СМ}}}$  установите минимальное напряжение (по осциллографу) на выходе перемножителя.

3. Заземлите входы  $X$  и  $Y$  и подстроечным резистором  $R_{11}(R_{Z_{\text{СМ}}})$  установите минимальное напряжение на выходе перемножителя.

4. Повторять пп. 1–3 до тех пор, пока при переходе от одного пункта к другому показания осциллографа не будут изменяться и будут равны 0.

При настройке на переменном токе необходимо:

1. Подать на вход  $X$  переменное напряжение, на вход  $Y$  0. Переменным резистором  $R_{Y_{\text{СМ}}}$  добиться минимального размаха переменной составляющей на выходе. Этим достигается балансировка по входу  $Y$ .

2. Подать на вход  $Y$  переменное напряжение, на вход  $X$  0. Переменным резистором  $R_{X,CM}$  добиться минимального размаха переменной составляющей на выходе. Этим достигается балансировка по входу  $X$ .

3. Подать на входы  $X$  и  $Y$  0. Переменным резистором  $R_{Z,CM}$  добиться 0 на выходе.

Настройка на переменном токе быстрее, но требует наличия источника переменного напряжения.

### *1.3. Нелинейность перемножения АПС*

Нелинейность перемножения по входу  $X$  (или  $Y$ )  $N_X$  ( $N_Y$ ) – это составляющая погрешности перемножения, представляющая максимальную разность между фактическим и теоретическим значениями выходного сигнала при скомпенсированных статических ошибках перемножителя, включающих смещение на входах  $X$  и  $Y$  (разбаланс входов), на выходе (разбаланс выходного каскада) и среднюю погрешность масштабного коэффициента.

Нелинейность перемножения – составляющая погрешности перемножения, не поддающаяся уменьшению, характеризует предельные возможности входов АПС при подаче на один из них максимального входного напряжения  $\pm 10$  В, а на другой – развертки напряжения, ограниченной максимально допустимыми уровнями.

### *1.4. Напряжение смещения АПС*

Исходя из п. 1.2 после настройки АПС на минимальную погрешность перемножения, для измерения напряжений смещений достаточно измерить напряжения на балансировочных входах микросхемы.

### *1.5. Остаточное напряжение АПС*

Остаточное напряжение по входу  $X$  (или  $Y$ )  $U_{ост.X}$  ( $U_{ост.Y}$ ) – это размах нелинейной составляющей напряжения на выходе перемножителя при полном размахе напряжения на данном входе и отсутствии напряжения на другом входе. Перед проведением измерения необходимо устранить выходное смещение перемножителя и линейную составляющую напряжения на его выходе.

## **2. Динамические параметры АПС**

Динамические параметры АПС характеризуют работу схемы в частотном диапазоне. Наиболее полно описывают динамические характеристики АПС полоса пропускания, граничные частоты амплитудной и векторной погрешности, скорость нарастания, время установления и время восстановления выходного напряжения.

Все динамические параметры измеряются отдельно для каждого входа АПС.

### 2.1. Полоса пропускания АПС

Полоса пропускания АПС ( $\Delta f_{\text{ПР.Х}}$  и  $\Delta f_{\text{ПР.У}}$ ) измеряется при подаче на один из входов перемножителя максимального напряжения, а на другой – синусоидального сигнала с амплитудой 10 % от максимального входного напряжения. При измерении полосы пропускания плавно увеличивают частоту входного сигнала, поддерживая его напряжение на входе постоянным до тех пор, пока напряжение на выходе микросхемы уменьшится до значения  $U_{\text{ВЫХ}} = 0,707 U_{\text{ВЫХ}0}$ , где  $U_{\text{ВЫХ}0}$  – напряжение на выходе микросхемы на частоте  $f = 0$  Гц. При этом регистрируют частоту входного сигнала, которая определяет верхнюю частоту полосы пропускания на уровне 3 дБ.

### 2.2. Скорость нарастания выходного напряжения

Скорость нарастания выходного напряжения – это максимальная скорость изменения выходного напряжения. Для измерения необходимо подать импульсное напряжение на один из входов, а на другой вход подать постоянное напряжение. На выходе АПС импульсное выходное напряжение имеет затянутые фронт и срез. Для наилучшего фронта или среза осциллографом измеряют интервал времени  $t$ , за который выходное напряжение изменится от уровня 0,1 до уровня 0,9 установившегося значения. Измеряют амплитуду выходного импульса  $A_{\text{И}}$ . Скорость нарастания выходного напряжения определяют по формуле

$$V_{\text{ВЫХ}} = \frac{0,8 \cdot A_{\text{И}}}{t}. \quad (13.3)$$

### 2.3. Время установления и время восстановления АПС

Время установления АПС – это время, затрачиваемое схемой на установление выходного напряжения в 10%-й зоне отклонения от напряжения полной шкалы (рис. 13.1). Для измерения времени установления на один вход перемножителя подается постоянное напряжение амплитудой  $+U_{\text{ВХ.МАКС}}$  или  $-U_{\text{ВХ.МАКС}}$ , на второй вход подается ступенчатое напряжение  $0-U_{\text{ВХ.МАКС}}$ . Время установления включает в себя время задержки схемой выходного напряжения  $t_{\text{ЗАД}}$ , время нарастания выходного напряжения  $t_{\text{Н}}$  и время затухания переходного процесса  $t_{\text{ЗАТ}}$

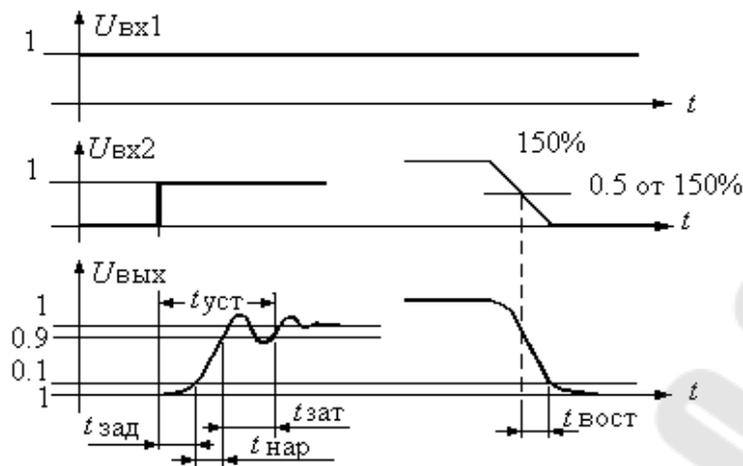


Рис. 13.1. Осциллограммы напряжений при измерении динамических параметров АПС

Время восстановления характеризует способность выхода аналогового перемножителя из состояния насыщения (рис. 13.1). При измерении времени восстановления на один из входов подается 50%-я перегрузка, а на другой вход – напряжение  $U_{\text{ВЫХ.МАКС}}$ . Время, в течение которого АПС возвращается в линейную область после того, как снята перегрузка и есть время восстановления микросхемы. Обычно измеряют интервал времени  $t_{\text{В}}$  между моментами достижения входным импульсом уровня 0,5 его максимальной амплитуды и уровня 0,1 от его установившегося значения.

#### 2.4. Граничная частота амплитудной погрешности перемножения

Граничная частота амплитудной погрешности перемножения – это частота  $f_{\text{г}}$ , на которой амплитуда выходного напряжения уменьшается на 1 %. Измерения производят при подаче на исследуемый вход малого сигнала (10 % от полной шкалы), а на другой вход напряжение полной шкалы. Поддерживая амплитуду сигнала на входе постоянной, плавно увеличивают частоту входного сигнала до тех пор, пока амплитуда сигнала на выходе микросхемы не уменьшится на 1 %. Фиксируют частоту входного сигнала, которая и будет граничной частотой амплитудной погрешности перемножения. При дальнейшем увеличении частоты  $f$  погрешность будет возрастать на величину  $\frac{f - f_{\text{г}}}{\Delta f_{\text{пр}}}$ .

#### 2.5. Граничная частота векторной погрешности перемножения

Измерение сдвига фазы между выходным и входным напряжениями АПС обычно вызывает серьезные трудности. Поэтому для определения фазовых искажений АПС введено понятие граничной час-

тоты векторной погрешности перемножения. Граничная частота векторной погрешности перемножения – это частота  $f_v$ , на которой мгновенная векторная разность между сигналами одной и той же частоты на входе и выходе АПС становится равной 1 %. Рис. 13.2 разъясняет определение фазового сдвига и взаимосвязь с векторной погрешностью перемножения.

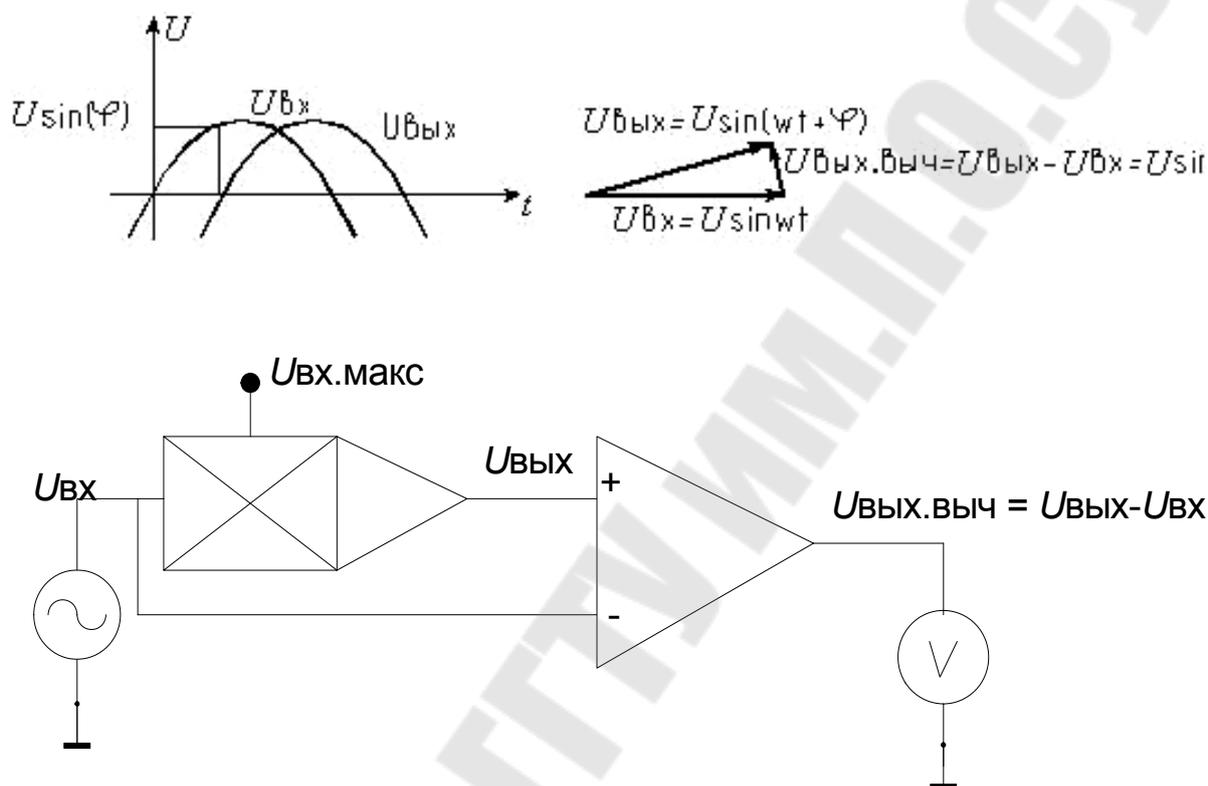


Рис. 13.2. Определение граничной частоты векторной погрешности

Так как частота, на которой происходят фазовые искажения, значительно ниже частоты амплитудной погрешности перемножения, то ослаблением амплитуды выходного напряжения обычно пренебрегают. Как видно из Рис. 13.2, векторной погрешности 1 % соответствует фазовый сдвиг 0,01 рад или  $0,573^\circ$ , т. е. частота на которой амплитуда выходного напряжения вычитателя изменится на величину  $U \cdot \sin(0,573^\circ) = U \cdot 0,01$ , т. е. на 1 % от амплитуды входного сигнала. Измерения производят аналогично измерению граничной частоты амплитудной погрешности перемножения. Плавно увеличивая частоту входного сигнала фиксируют частоту при которой амплитуда выходного напряжения вычитателя изменится на величину 1 % от амплитуды входного сигнала. Перемножитель должен быть предварительно настроен на минимальную погрешность.

### **Порядок выполнения работы**

Внимание! При данных номиналах внешних элементов максимальное напряжение для любого из входов АПС не должно превышать 5 В.

1. Произведите настройку АПС на минимальную погрешность согласно п. 1.2.

2. Измерьте напряжение смещения для каждого из входов перемножителя согласно п. 1.4. Для измерения напряжений смещений по входам АПС необходимо измерить напряжения на балансировочных входах  $U_{X,CM}$  и  $U_{Y,CM}$ . Сравните полученные данные со справочными данными для микросхемы 525ПС1 (напряжение смещения по  $X$ -,  $Y$ -входам не более  $\pm 500$  мВ).

3. Измерьте остаточные напряжения смещения для каждого из входов перемножителя согласно п. 1.5. Для измерения остаточного напряжения по входу  $X$  подайте на этот вход синусоидальное напряжение амплитудой 5 В и измерьте напряжение на выходе перемножителя при заземлённом входе  $Y$ . Для измерения остаточного напряжения по входу  $Y$  подайте на этот вход синусоидальное напряжение амплитудой 5 В и измерьте напряжение на выходе перемножителя при заземлённом входе  $X$ . Сравните полученные данные со справочными данными для микросхемы 525ПС1 (остаточное напряжение по  $X$ -входу не более 50 мВ, а для  $Y$ -входа не более 100 мВ).

4. Снимите характеристику линейного умножения для каждого из входов АПС – по 15–20 значений. Для этого на одном из входов установите постоянное напряжение +5 В, а на другом – изменяйте от –5 В до +5 В. Для обеспечения точности при последующих расчетах установку и измерение произведите с максимальной точностью.

5. Рассчитайте погрешность перемножения по формуле (13.2), приведенной в п. 1.1 для каждой точки характеристики, результаты оформите в виде таблицы. Постройте зависимость погрешности перемножения от напряжения на входе в масштабе для обоих входов АПС (погрешность перемножения в процентах к полной шкале  $\pm 10$  В не более  $\pm 2$  %).

6. По данным п. 5 рассчитайте нелинейность перемножения по входам АПС (нелинейность перемножения по  $X$ -входу ( $-10 \text{ В} \leq X \leq +10$ ,  $Y = \pm 10 \text{ В}$ ) равна  $\pm 2$  %).

7. Измерьте скорость нарастания выходного сигнала АПС для каждого из входов перемножителя (скорость нарастания выходного напряжения, типовое равно 10 В/мкс). Для измерения необходимо: установить амплитуду прямоугольных импульсов генератора – 5 В, частоту следования импульсов – 10 кГц; подать эти импульсы на вход  $X$ , а на вход  $Y$  подать постоянное напряжение 5 В.

Провести измерения согласно п. 2.2 и по формуле (13.3) рассчитать скорость нарастания выходного сигнала.

7.1. Измерьте полосу пропускания АПС для каждого из входов АПС согласно п. 2.1 (полоса пропускания не менее 1,5 МГц).

7.2. Измерьте время установления и время восстановления АПС согласно п. 2.3.

7.3. Измерьте граничную частоту амплитудной погрешности перемножителя согласно п. 2.4 (типовое значение равно 100 кГц).

7.4. Измерьте граничную частоту векторной погрешности перемножителя согласно п. 2.5.

7.5. Исследуйте АПС в режиме квадратора. Для этого объедините входы АПС и подайте на них синусоидальный сигнал с генератора амплитудой 5 В. Зарисуйте осциллограммы входного и выходного сигналов.

7.6. Исследуйте АПС в режиме перемножения двух синусоидальных сигналов разной частоты. Для этого подайте на входы сигналы от разных генераторов и наблюдайте выходное напряжение на осциллографе. Напишите формулу для выходного сигнала перемножителя.

### ***Содержание отчета***

Отчет должен содержать основные теоретические сведения, функциональную схему ИМС АПС К525ПС1 с внешними элементами и усилителем с симметричным входом по типовой схеме включения, результаты выполнения работы по всем пунктам, необходимые расчеты со всеми промежуточными результатами, схемы всех экспериментов, необходимые таблицы и основное – выводы по результатам выполнения лабораторной работы.

### ***Контрольные вопросы***

1. Дайте определение аналогового перемножителя сигналов. Перечислите способы построения перемножителей.

2. Как определяется погрешность аналоговых перемножителей сигналов?

3. Как осуществляется настройка АПС на минимальную погрешность?

4. Какими основными статическими параметрами характеризуется аналоговый перемножитель сигналов?

5. Какими основными динамическими параметрами характеризуется аналоговый перемножитель сигналов?

## Лабораторная работа № 14

### ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ АНАЛОГОВЫХ ПЕРЕМНОЖИТЕЛЕЙ СИГНАЛОВ

**Цель работы:** исследовать схемы включения перемножителя в качестве делителя, корнеизвлекающего устройства, регулируемого сопротивления.

#### *Используемое оборудование:*

- блок питания  $\pm 15$  В;
- лабораторный макет на АПС 525ПС2;
- осциллограф С1-83;
- генератор ГЗ-112.1;
- вольтметр В7-37 – 3 шт;
- комплект проводов.

#### *Теоретическая часть*

##### **Области применения АПС**

Среди большого разнообразия нелинейных аналоговых функциональных преобразователей едва ли не самым главным по применимости является аналоговый перемножитель сигналов. По существу, аналоговый перемножитель сигналов (АПС) занимает второе место по использованию в аналоговой технике, уступая лишь ОУ. Совместно с другими функциональными преобразователями (ОУ, фильтрами, логарифмическими преобразователями, линиями задержки и др.) АПС выполняет задачи вычисления значения действующего напряжения, фазы, экспоненциальных и трансцендентных функций, корреляционных зависимостей. При использовании АПС в связной аппаратуре можно реализовать все виды детекторов (линейные, квадратичные, синхронные, фазовые, частотные и др.) и модуляторов-демодуляторов (амплитудные, балансные, синхронные, бифазные, частотные и др.). Кроме того, на основе перемножителей возможно построение различных устройств автоматической регулировки усиления (устройства АРУ, компрессоры и экспандеры) и перестраиваемых напряжением активных фильтров и управляемых генераторов.

##### **Описание микросхемы 525ПС2**

В лабораторной работе используется микросхема аналогового перемножителя сигналов 525ПС2. Данная микросхема отличается от рассмотренной в предыдущей лабораторной работе микросхемы

525ПС1 тем, что в ней применяется дополнительная стабилизация рабочих режимов (стабилизация токов источников токов), а также микросхема 525ПС2 имеет встроенный ОУ.

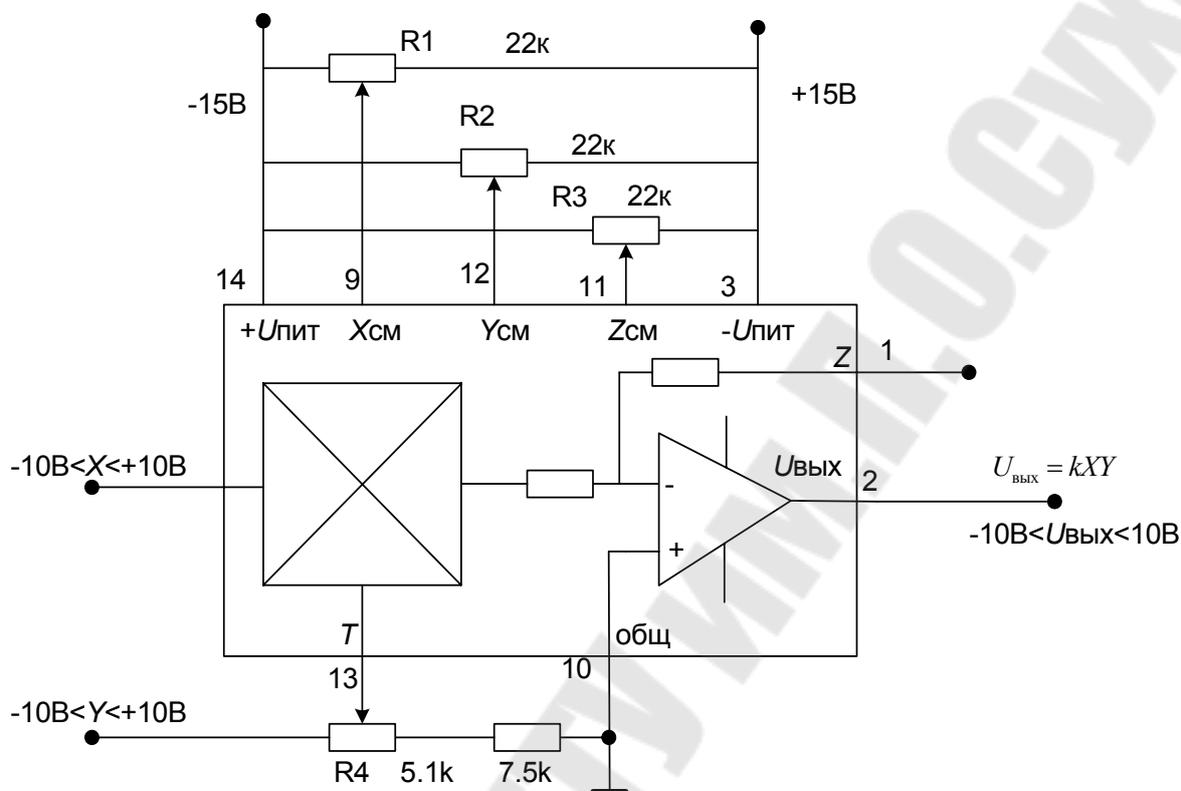


Рис. 14.1. Структурная схема и схема включения микросхемы АПС 525ПС2 в режиме умножения

Данная микросхема является неинвертирующей, т. к. непосредственно внутренний перемножитель имеет отрицательный коэффициент передачи и внутренний ОУ включен как инвертирующий усилитель. На рис. 14.1 переменный резистор  $R_4$  служит для подстройки коэффициента перемножения  $k$  до значения 0,1.

### Использование АПС в качестве делителя напряжения

Если в обратную связь операционного усилителя включить схему аналогового перемножителя, образуется делитель напряжения.

Так как микросхема 525ПС2 имеет встроенный операционный усилитель, то простая коммутация внешних выводов позволяет получить делитель напряжения (рис. 14.2). Настройка делителя может быть сведена к настройке перемножителя путем разрыва обратной связи, но большей точности можно достичь если настраивать непосредственно делитель напряжения.

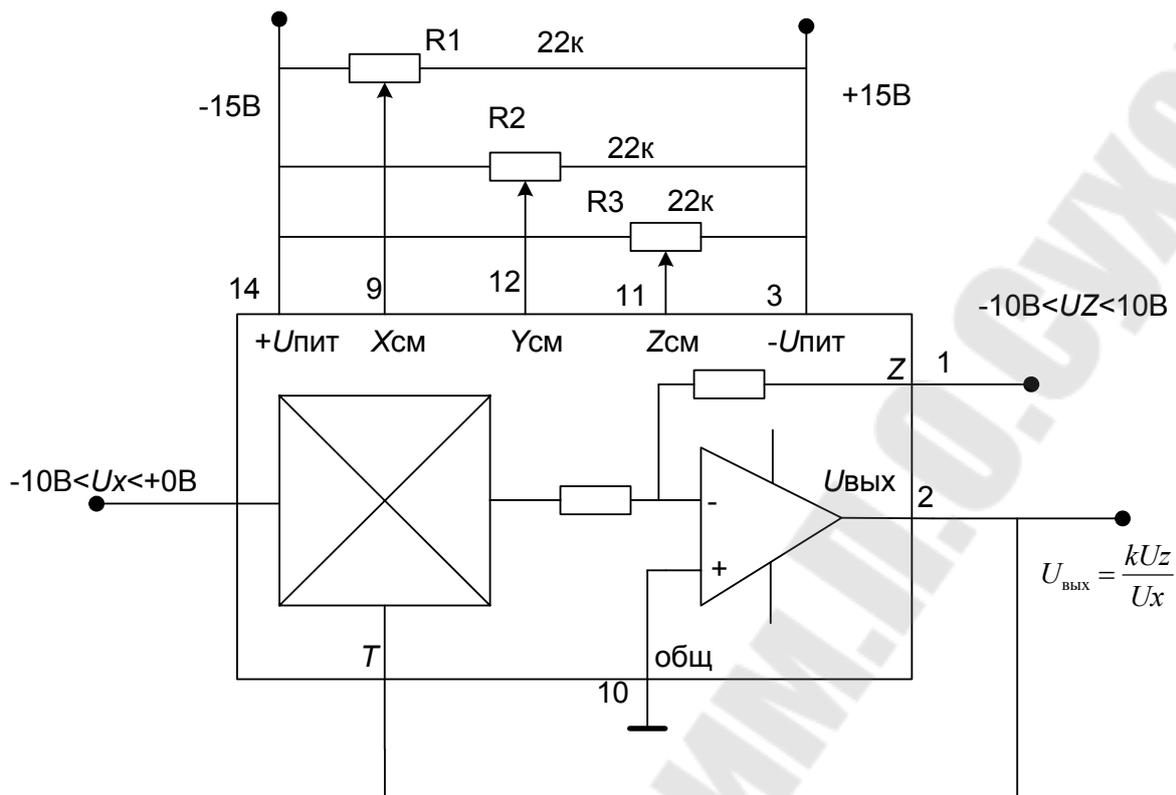


Рис. 14.2. Схема включения АПС 525ПС2 в режиме деления

В этой схеме включения  $U_Z$  может быть произвольной полярности, в то время как  $U_X$  может быть принимать лишь отрицательное значение. Если  $U_X > 0$ , то отрицательная обратная связь становится положительной, и выходное напряжение делителя устанавливается на значении, определяемом напряжением насыщения операционного усилителя.

При малом отрицательном напряжении знаменателя  $U_X$  (из-за большого затухания АПС) усиление в цепи обратной связи операционного усилителя очень велико, и тогда напряжение погрешности перемножения на входе ОУ могут создать насыщение на выходе. Это насыщение не означает запираания схемы, потому что при достаточно больших отрицательных значениях  $U_X$  восстанавливается правильный режим деления.

### Возведение в степень

При параллельном соединении двух входов  $X$  и  $Y$  перемножителя образуется схема, возводящая в квадрат, т. е. выходное напряжение этой схемы пропорционально квадрату входного напряжения. Возведение в более высокие степени (3-, 4-, 5-ю и т. д.) достигается простым последовательным включением нескольких АПС.

## Извлечение корня

Устройство для извлечения квадратного корня образуется путем включения в отрицательную обратную связь операционного усилителя схемы квадратора (рис. 14.3).

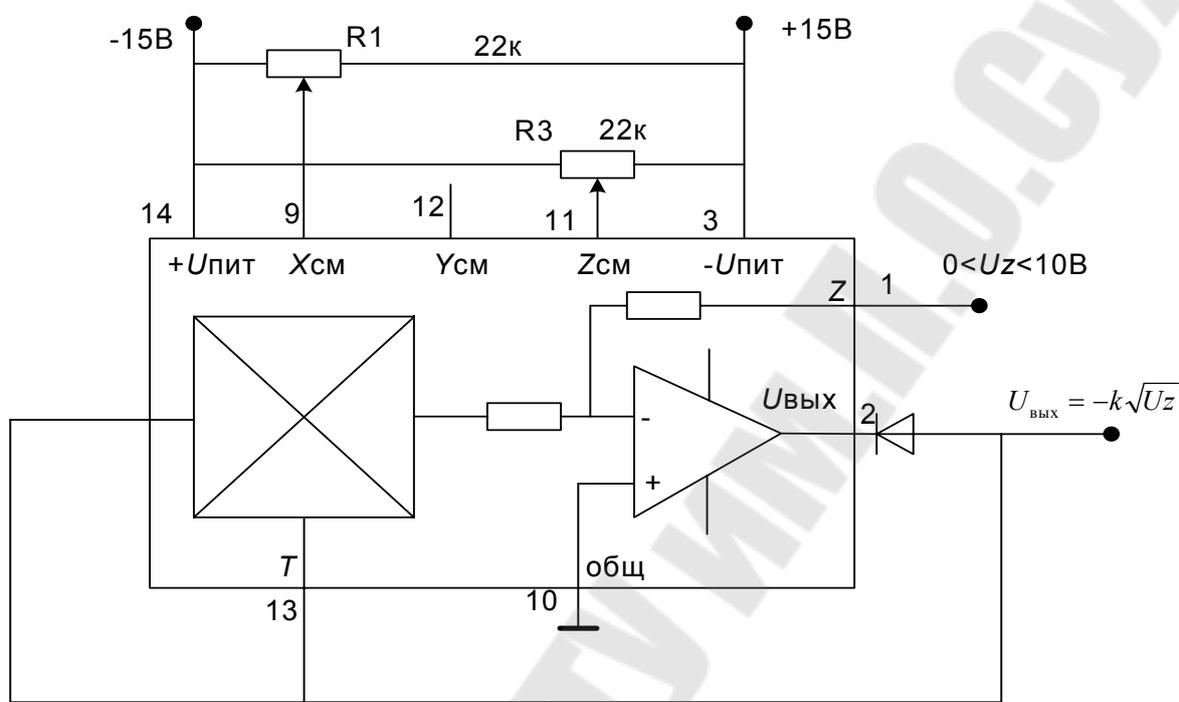


Рис. 14.3. Схема включения 525PC2 в режиме извлечения квадратного корня

При  $U_{\text{ВЫХ}} = -k\sqrt{U_Z}$  и этом включении  $U_Z$  может быть только отрицательным. В случае положительного значения  $U_Z$  схема запирается и только разрывом цепи обратной связи ее можно вновь привести в исходное рабочее состояние. Эффект запираания наблюдается из-за того, что напряжение на выходе квадратора всегда одного знака и не зависит от полярности входного сигнала. Так, для микросхемы 525PC2 напряжение на выходе квадратора (т. е. на входе встроенного ОУ) всегда имеет отрицательный знак и при отрицательном входном напряжении и при положительном. Так как между выходом ОУ и его инвертирующим входом включен квадратор, то для получения отрицательной обратной связи необходимо, чтобы квадратор не инвертировал сигнал. Это возможно лишь при отрицательном напряжении на выходе ОУ (на входе квадратора), а отрицательное напряжение на выходе ОУ будет при отрицательной полярности входного сигнала ( $U_Z$ ). Для предотвращения запираания схемы на выходе операционного усилителя необходимо включить диод, который при положительном выходном напряжении прерывает обратную связь.

Падение напряжения на диоде приводит к дополнительной ошибке, которой, из-за того что диод включен в цепь обратной связи, можно пренебречь.

Так как напряжение подается на два входа перемножителя одновременно, то для настройки АПС на минимальную погрешность в режиме извлечения корня или в режиме возведения в квадрат достаточно всего два внешних переменных резистора (т. к. регулировкой одного резистора по входу возможно убрать ошибку от напряжения смещения по другому входу тоже). Поэтому на схеме на рис. 14.5 отсутствует переменный резистор на входе  $U_{см}$ .

### **Использование АПС в качестве управляемого усилителя**

Аналоговые перемножители сигналов можно представить в качестве регулируемого усилителя. Входной сигнал (усиливаемый) подается на один из вход перемножителя, а управляющий сигнал (который управляет коэффициентом усиления) подается на другой вход перемножителя. Так как АПС имеет по входам нелинейность, то для получения меньших искажений и большего динамического диапазона рекомендуется входной (усиливаемый) сигнал подавать на вход, имеющий меньшую нелинейность. Выходное напряжение АПС можно представить в виде

$$U_{ВЫХ} = k \cdot U_X, \quad (14.1)$$

где  $k = k_{АПС} \cdot U_Y$ .

Если необходимо получить другой закон регулирования, то вместо перемножителя можно использовать схему делителя напряжений. В качестве регулируемого усилителя перемножитель (делитель) может широко использоваться в системах автоматической регулировки усиления (АРУ), а также в компрессорах и экспандерах (устройствах сужающих и расширяющих динамический диапазон сигнала) и в других устройствах, где необходимо достаточно точно регулировать один сигнал в зависимости от другого.

### **Использование АПС в качестве управляемого сопротивления**

Кроме того, что АПС используется в качестве регулируемого усилителя, широко известна схема включения АПС в качестве регулируемого сопротивления. Такая схема носит название «АПС + R» (рис. 14.4).

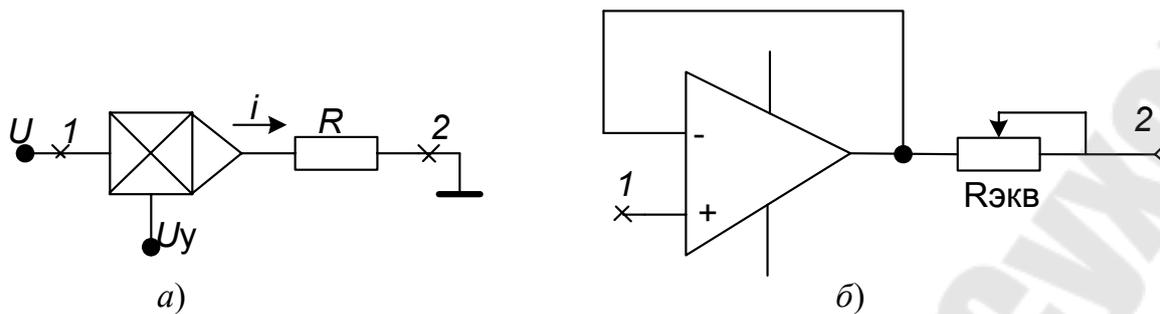


Рис. 14.4. Конфигурация «АПС + R» (а) и схема замещения (б)

Рассчитаем значение эквивалентного сопротивления для этой схемы включения АПС. Значение выходного тока  $I$ , протекающего через резистор  $R$ , определяется

$$I = \frac{U_{\text{АПС}}}{R} = \frac{k \cdot U_X \cdot U_Y}{R}. \quad (14.2)$$

Найдем значение эквивалентного сопротивления, включенного между точками 1 и 2 на рис. 14.4. Для этого необходимо разделить напряжение между этими точками на ток протекающий между этими точками:

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{U_{12}}{I_{12}} = \frac{U_X}{I} = \frac{U_X}{k \cdot U_X \cdot U_Y} \cdot R = \frac{R}{k \cdot U_Y}. \quad (14.3)$$

Последняя формула показывает, что эквивалентное сопротивление конфигурации «АПС + R» обратно пропорционально управляющему напряжению  $U_Y$ . Эта конфигурация может широко использоваться при построении активных RC-фильтров, управляемых напряжением или RC-генераторов, управляемых напряжением и во многих других случаях. При использовании конфигурации «АПС + R» не следует забывать, что это не полный аналог сопротивления и более точная схема замещения имеет вид, представленный на рис. 14.4, б (при положительном значении сигнала  $U_Y$ ). При отрицательной полярности сигнала  $U_Y$  повторитель на схеме замещения (б) заменяется на инвертор с единичным коэффициентом передачи. Если конфигурация «АПС + R» включается в цепь обратной связи, следует соблюдать такую полярность управляющего напряжения, чтобы отрицательная обратная связь не стала положительной.

### Преобразователи частоты на АПС

При подаче на входы АПС синусоидальных сигналов различной частоты напряжение на выходе будет определяться в соответствии с математическим выражением для произведения двух синусов:

$$U_{\text{ВЫХ}} = A_1 \sin(\omega_1 \cdot t) \cdot A_2 \sin(\omega_2 \cdot t) = \frac{A_1 A_2}{2} \cdot \cos((\omega_1 - \omega_2) \cdot t) - \frac{A_1 A_2}{2} \cdot \cos((\omega_1 + \omega_2) \cdot t), \quad (14.4)$$

т. е. напряжение на выходе будет представлять собой сумму двух синусоидальных сигналов: один сигнал с частотой, равной сумме частот подаваемых сигналов, второй с частотой, равной разности частот подаваемых сигналов. И если на выходе поставить фильтр низкой частоты, выделяющий сигнал разностной частоты, то сигнал высокой частоты отфильтровывается и происходит линейный перенос спектра входного сигнала в область низких частот.

### Фазовые детекторы на АПС

Если подать на соответствующие входы АПС напряжения сигналов  $U_X = U_{\text{ОП}} \cdot \sin(\omega \cdot t)$  и  $U_Y = U_C \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$ , то на выходе перемножителя напряжение будет определяться следующим образом:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{МП}} \cdot U_C}{2} \cdot \cos(\varphi) - \frac{U_{\text{МП}} \cdot U_C}{2} \cdot \cos(2\omega \cdot t + \varphi). \quad (14.5)$$

Подключив к выходу такого перемножителя фильтр низких частот, который не пропускает сигнал удвоенной частоты, то на выходе фильтра будет присутствовать только сигнал пропорциональный косинусу угла сдвига фаз входных сигналов.

### Порядок выполнения работы

1. Исследование делителя напряжения на микросхеме К525ПС2. Соберите схему делителя напряжения по рис. 14.2. Установите напряжение на входе X (контакт 7) –10В, а напряжение на входе Z (контакт 1) изменяйте от –10 В до +10 В с шагом 1–2 В, измеряя при этом напряжение на выходе (контакт 2). Рассчитайте приведенную погрешность делителя по формуле

$$\delta = \frac{U_{\text{ВЫХ.ИЗМ}} - U_{\text{ВЫХ.ТЕОР}}}{U_{\text{ВЫХ.ИЗМ.МАКС}}} \cdot 100 \%, \quad (14.6)$$

где  $U_{\text{ВЫХ.ТЕОР}}$  рассчитывается по формуле

$$U_{\text{ВЫХ.ТЕОР}} = \frac{k \cdot U_Z}{U_X}, \quad (14.7)$$

где  $k$  – коэффициент деления, который в свою очередь определяется для крайней точки измерений (где выходное напряжение не превышает напряжения 10 В) по формуле

$$k = \frac{U_{\text{ВЫХ.МАКС}} \cdot U_X}{U_Z} \quad (14.8)$$

Данные измерений и расчетов занести в табл. 14.1.

Заданная точность обеспечивается при выходном сигнале менее 10 В, следовательно при расчете точностных характеристик используются точки, в которых выходное напряжение менее 10 В.

Таблица 14.1

$U_X, \text{ В}$	-10	-10	-10	...	-10	-10	-10
$U_Z, \text{ В}$	-10	...	...	...	...	...	+10
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$							
$U_{\text{ВЫХ.ТЕОР}}, \text{ В}$							
$\partial, \%$							

Подайте на вход  $X$  сигнал другой полярности и измерьте напряжение на выходе  $Z$  для нескольких значений сигнала  $U_Z$  в диапазоне от  $-10$  до  $+10$  В. Объясните результат.

2. Исследование АПС в режиме квадратора. Для этого объедините входы АПС и подайте на них синусоидальный сигнал с генератора амплитудой 5 В. Зарисуйте осциллограммы входного и выходного сигналов. Напишите формулу для выходного сигнала.

3. Исследование корнеизвлекающего устройства на микросхеме 525ПС2. Соберите схему корнеизвлекающего устройства на микросхеме 525ПС2 по рис. 14.3 (без диода на выходе). Изменяйте напряжение на входе  $Z$  (контакт 1) от  $-10$  до  $0$  В с шагом 1 В, измеряя при этом напряжение на выходе  $U_{\text{ВЫХ}}$  (контакт 2). Рассчитайте приведенную погрешность корнеизвлекающего устройства по формуле

$$\partial = \frac{U_{\text{ВЫХ.ИЗМ}} - U_{\text{ВЫХ.ТЕОР}}}{U_{\text{ВЫХ.ИЗМ.МАКС}}} \cdot 100 \%, \quad (14.9)$$

где  $U_{\text{ВЫХ.ТЕОР}}$  рассчитывается по формуле

$$U_{\text{ВЫХ.ТЕОР}} = -k\sqrt{U_Z}, \quad (14.10)$$

где  $k$  – коэффициент преобразования в режиме извлечения корня и определяется для крайней точки измерений по формуле

$$k = \frac{U_{\text{ВЫХ.ИЗМ.МАКС}}}{-\sqrt{U_Z}}. \quad (14.11)$$

Заданная точность обеспечивается при выходном сигнале менее 10 В, следовательно при расчете точностных характеристик в качестве крайней точки берется первая точка с  $U_{\text{ВЫХ}}$  менее 10 В. Данные измерений и расчетов занести в табл. 14.2.

Таблица 14.2

$U_X, \text{ В}$	+10	...	...	...	...	...	+10
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$							
$U_{\text{ВЫХ.ТЕОР}}, \text{ В}$							
$\partial, \%$							

Подайте на вход  $Z$  сигнал другой полярности и измерьте напряжение на выходе для нескольких значений сигнала  $U_Z$  в диапазоне от 0 до +10 В. Объясните результат.

4. Исследуйте АПС в режиме управляемого сопротивления «АПС + R». Для этого соберите схему, представленную на рис. 14.5.

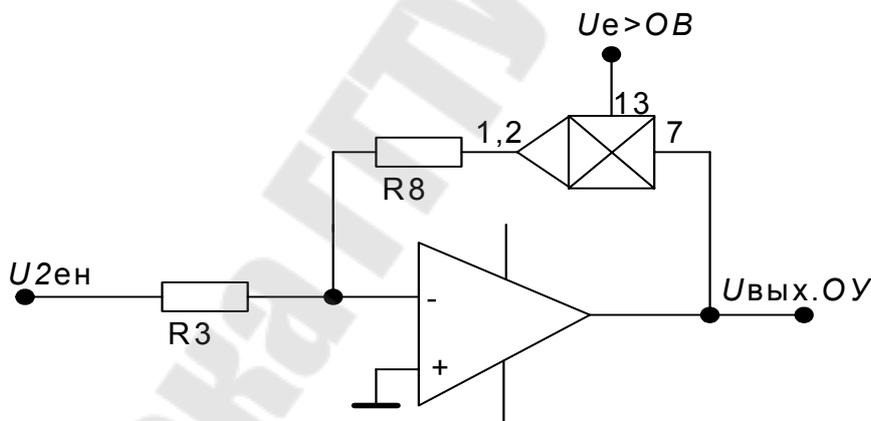


Рис. 14.5. Схема эксперимента для исследования конфигурации «АПС + R»

Измерьте сопротивление резисторов  $R_3$  и  $R_8$ . Подайте на вход ОУ напряжение от генератора частотой 100–1000 Гц. Изменяя напряжение на входе  $Y$  от 0 до +10 В, измерьте напряжение на выходе ОУ. Измерение производить вольтметрами и контролировать осциллографом. Для каждой точки измерения рассчитайте значение эквивалентного сопротивления цепи обратной связи по формуле

$$R_{\text{ЭКВ}} = -\frac{U_{\text{ВЫХ.ОУ}} \cdot R_3}{U_{\text{ГЕН}}} \quad (14.12)$$

и сравните это расчетное значение с теоретическим рассчитанным по формуле

$$R_{\text{ЭКВ}} = \frac{U_{12}}{I_{12}} = \frac{U_X}{I} = \frac{U_X}{k \cdot U_X \cdot U_Y} \cdot R = \frac{R}{k \cdot U_Y} \quad (14.13)$$

Данные эксперимента занести в табл. 14.3.

Таблица 14.3

$U_{\text{ГЕН}}, \text{ В}$							
$U_{\text{ВЫХ.ОУ}}, \text{ В}$							
$U_Y, \text{ В}$							
$R_{\text{ЭКВ.РАСЧ}}, \text{ кОм}$							
$R_{\text{ЭКВ.ТЕОР}}, \text{ кОм}$							

5. Исследуйте АПС в режиме преобразователя частоты.

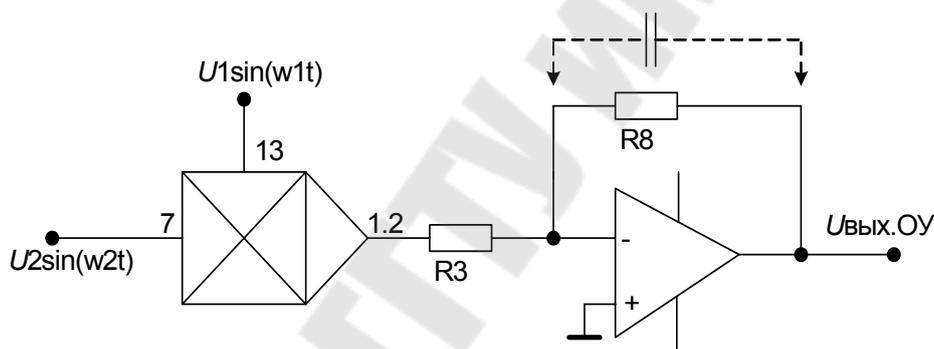


Рис. 14.6. Схема исследования АПС в режиме преобразователя частоты

Подайте на входы АПС в режиме перемножения два синусоидальных сигнала разной частоты. Для этого подайте на входы сигналы от разных генераторов и наблюдайте выходное напряжение на осциллографе. Напишите формулу для выходного сигнала перемножителя в этом случае. Измерьте частоту выходного сигнала фильтра и сравните с разницей  $\omega_1 - \omega_2$ .

### Содержание отчета

Отчет должен содержать основные теоретические сведения, результаты выполнения работы по всем пунктам, необходимые расчеты со всеми промежуточными результатами, схемы всех экспериментов, необходимые таблицы и основное – выводы по результатам выполнения лабораторной работы.

### *Контрольные вопросы*

1. Перечислите основные области применения аналоговых перемножителей сигналов.
2. Приведите основные параметры и структурную схему ИМС 525ПС2.
3. Как реализуется делитель напряжения с использованием аналогового перемножителя сигналов?
4. Как осуществляется возведение в степень и извлечение корня с использованием аналогового перемножителя сигналов?
5. Как реализуется управляемый усилитель и управляемое сопротивление с использованием аналогового перемножителя сигналов?
6. Как осуществляется преобразование частоты с использованием аналогового перемножителя сигналов?

## Содержание

Лабораторная работа № 13. Исследование интегральных микросхем аналоговых перемножителей сигналов.....	3
Лабораторная работа № 14. Применение интегральных микросхем аналоговых перемножителей сигналов.....	12

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

**АНАЛОГОВЫЕ  
ПЕРЕМНОЖИТЕЛИ СИГНАЛОВ**  
**Лабораторный практикум**  
**по курсу «Микроэлектроника и микросхемотехника»**  
**для студентов специальности 1-36 04 02**  
**«Промышленная электроника»**

**Электронный аналог печатного издания**

Редактор *Н. В. Гладкова*  
Компьютерная верстка *М. В. Аникеенко*

Подписано в печать 20.12.08.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Цифровая печать. Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,36.

Изд. № 50.

E-mail: [ic@gstu.gomel.by](mailto:ic@gstu.gomel.by)

<http://www.gstu.gomel.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Издательский центр учреждения образования  
«Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0131916 от 30.04.2004 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.