

Министерство образования Республики Беларусь

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

Кафедра «Промышленная электроника»

ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ И КОМПАРАТОРЫ

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

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2007

УДК 621.375.132(075.8)
ББК 32.844.1я73
О-60

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
факультета автоматизированных и информационных систем
ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 22 от 20.05.2006 г.)*

Автор-составитель: *Л. А. Захаренко*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Автоматизированный электропривод»
ГГТУ им. П. О. Сухого *Д. А. Хабибуллин*

О-60 **Операционные** усилители и компараторы : лаб. практикум по курсу «Микроэлектроника и микросхемотехника» для студентов специальности 1-36 04 02 «Промышленная электроника» / авт.-сост. Л. А. Захаренко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2007. – 30 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://gstu.local/lib>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-420-568-7.

Данный лабораторный практикум является продолжением цикла лабораторных работ и включает в себя три лабораторные работы. Рассматриваются теоретические сведения об основных параметрах операционных усилителей, компараторов напряжения, устройств выборки и хранения и методах их измерения.

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

УДК 621.375.132(075.8)
ББК 32.844.1я73

ISBN 978-985-420-568-7

© Захаренко Л. А., составление, 2007
© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2007

ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Цель работы: научиться определять опытным путем шумовые параметры операционных усилителей (ОУ).

Используемое оборудование: блок питания ± 15 В; лабораторный макет со сменными платами ОУ; осциллограф С1-83; генератор ГЗ-112/1; милливольтметр ВЗ-55А; комплект проводов.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Шумы усилителей

Почти в любой области измерений значение предельно различного слабого сигнала определяется шумом – мешающим сигналом, который забивает полезный сигнал. Даже если измеряемая величина и не мала, шум снижает точность измерения. Некоторые виды шума неустранимы принципиально (например, флуктуации измеряемой величины), и с ними можно бороться только методами усреднения сигнала и сужения полосы. Другие виды шума (например, помехи на радиочастоте и «петли заземления») можно уменьшить или исключить с помощью разных приемов, включая фильтрацию, а также тщательное продумывание расположения проводов и элементов схемы. И наконец, существует шум, который возникает в процессе усиления, и его можно уменьшить применением малошумящих усилителей. Хотя техника осреднения сигнала часто применяется для извлечения сигнала, маскируемого шумом, имеет смысл для начала убедиться, что система свободна от всех устранимых помех и обладает наименьшим, практически возможным шумом усилителя.

Происхождение и виды шумов

Термин «шум» применяется ко всему тому, что маскирует полезный сигнал, поэтому шумом может оказаться какой-то другой сигнал («помеха»); но чаще всего этот термин означает «случайный» шум физической (чаще тепловой) природы. Шум характеризуется своим частотным спектром, распределением амплитуд и источником (происхождением). Мы назовем основных «возмутителей спокойствия».

Джонсоновский шум

Любой резистор на плате генерирует на своих выводах некоторое напряжение шума, известное как «шум Джонсона» (тепловой шум). У него горизонтальный частотный спектр, т. е. одинаковая мощность шума на всех частотах (разумеется, до некоторого предела). Шум с горизонтальным спектром называют «белым шумом».

Реальное напряжение шума в незамкнутой цепи, порожденное сопротивлением R , находящимся при температуре T , выражается формулой:

$$U_{\text{Ш.РЕАЛ}} = U_{\text{ШR}} = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot B}, \quad (10.1)$$

где k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура в Кельвинах ($^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273$ $^{\circ}\text{C}$); B – полоса частот в Гц.

Таким образом, $U_{\text{Ш.РЕАЛ}}$ – это то, что получится на выходе совершенно бесшумного фильтра с полосой пропускания B , если подать на его вход напряжение, порожденное резистором при температуре T . Например, резистор на 10 кОм при комнатной температуре имеет среднеквадратичное напряжение шума в разомкнутой цепи порядка 1,3 мкВ, измеренное в полосе 10 кГц (измерять можно, например, подсоединив резистор ко входу высококачественного усилителя и наблюдая напряжение на выходе усилителя вольтметром). Сопротивление источника этого напряжения шума равно просто R .

Если в формулу (10.1) подставить численное значение постоянной Больцмана и значение комнатной температуры (68 $^{\circ}\text{F} = 20$ $^{\circ}\text{C} = 293$ $^{\circ}\text{K}$) и примем $B = 1$ Гц, то получим следующее выражение для эффективного напряжения шума одиночного резистора в единичной полосе частот:

$$U_{\text{Ш.ЭФФ}} \left[\frac{\text{В}}{\sqrt{\text{Гц}}} \right] = 1,27 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{R}. \quad (10.2)$$

Дробовой шум

Электрический ток представляет собой движение дискретных зарядов, а не плавно непрерывное течение. Конечность (квантованность) заряда приводит к статистическим флуктуациям тока. Если заряды действуют независимо друг от друга, то флуктуирующий ток определяется следующей формулой:

$$I_{\text{Ш.ЭФФ}} = I_{\text{ШR}} = \sqrt{2 \cdot q \cdot I_{\text{УСТ}} \cdot B}, \quad (10.3)$$

где q – заряд электрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл); I – постоянная составляющая («установившееся» значение) тока; B – ширина полосы частот измерения.

Например, «установившийся» ток в 1 А фактически имеет флуктуации со среднеквадратичным значением 57 нА в полосе шириной 10 кГц, т. е. он отклоняется примерно на 0,000006 %. Относительные флуктуации больше для меньших токов: «установившийся» ток в 1 мкА имеет флуктуации (среднеквадратичные) в той же полосе частот 0,006 %, т. е. 85 дБ. При постоянном токе 1 пА среднеквадратичные флуктуации тока (полоса та же) будут составлять 56 фА, т. е. отклонение на 5,6 %! Дробовой шум – это «шум дождя на жестяной крыше». Как и резистивный шум Джонсона, это гауссовский белый шум.

Шум $1/f$ (фликкер-шум)

Дробовой и тепловой шум – это вид неуменьшаемого шума, возникающий в соответствии с законами физики. Самый дорогой и тщательно изготовленный резистор имеет тот же тепловой шум, что и дешевый углеродный резистор с тем же сопротивлением. Реальные устройства, кроме того, имеют различные источники «избыточных шумов». Реальные резисторы подвержены флуктуациям сопротивления, которые порождают дополнительное напряжение шума (которое складывается с постоянно присутствующим напряжением теплового шума), пропорциональное протекающему через резистор постоянному току. Этот шум зависит от многих факторов, связанных с конструкцией конкретного резистора, включая резистивный материал и особенно концевые соединения. Вот типичные значения избыточного шума различных типов резисторов, выраженные в микровольтах на вольт, приложенного к резистору напряжения (приводится среднеквадратичное значение, измеренное на одной декаде частоты):

- Углеродно-композитные – от 0,10 до 3,0 мкВ.
- Углеродно-пленочные – от 0,05 до 0,3 мкВ.
- Металлопленочные – от 0,02 до 0,2 мкВ.
- Проволочные – от 0,01 до 0,2 мкВ.

Этот шум имеет спектр, примерно описываемый зависимостью $1/f$ (постоянная мощность на декаду частоты), и иногда называется «розовым шумом». Шум, возникающий по другим причинам, также часто имеет спектр $1/f$; примерами таких шумов являются шум тока базы у транзистора и шум катодного тока в электронных лампах.

Помехи

Как уже говорилось, одной из форм шумов являются мешающие сигналы или паразитные наводки. В этом случае спектр и амплитудные характеристики зависят от мешающего сигнала. Например, наводка от сети 50 Гц имеет спектр в виде пика (или ряда пиков) и относительно постоянную амплитуду, а шум зажигания автомобиля, шум грозовых разрядов и другие шумы импульсных источников имеют широкий спектр и всплески амплитуд. Другим источником помех являются радио- и телепередающие станции (особенно серьезна эта проблема вблизи больших городов), окружающее электрооборудование, моторы, лифты, метро, выключатели, переключательные стабилизаторы, телевизоры.

Все эти проблемы существуют в слегка измененном виде во всех тех случаях, когда что-нибудь влияет на измеряемый вами параметр. Например, оптический интерферометр восприимчив к вибрации, а на чувствительные измерения радиочастот (например, в ЯМР-спектроскопии) может повлиять внешний радиочастотный сигнал. Многие схемы, равно как детекторы или даже кабели, чувствительны к вибрациям и звуку, и они, по торговой терминологии, страдают «микрофонным эффектом».

От многих из этих источников шума можно отделаться путем тщательного экранирования и фильтрации. Иногда приходится принимать совершенно драконовские меры, включая монолитные каменные столы (для виброизоляции), комнаты с постоянной температурой, звукопоглощающие камеры и комнаты с электрической экранировкой.

Расчет шумовых параметров операционных усилителей

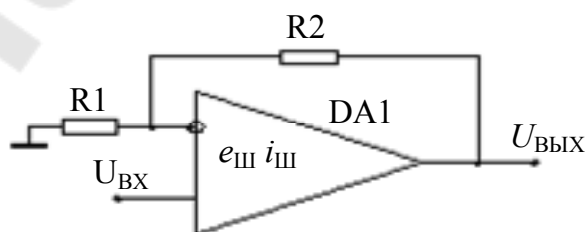


Рис. 10.1. Схема неинвертирующего усилителя на операционных усилителях

Для неинвертирующего усилителя (рис. 10.1) на ОУ, с собственным напряжением шума $e_{\text{ш}}$ и током шума $i_{\text{ш}}$, источники шума на входе будут (рис. 10.2):

$$i_{\text{Y}}^2 = i_{\text{ш}}^2, \quad (10.4)$$

$$e_{\text{Y}}^2 = e_{\text{ш}}^2 + 4 \cdot k \cdot T \cdot R_{\parallel} + (i_{\text{ш}} \cdot R_{\parallel})^2, \quad (10.5)$$

где $i_{\text{ш}}$ – эквивалентный ток шума ОУ; $e_{\text{ш}}$ – эквивалентное напряжение шума ОУ; R_{\parallel} – параллельное сопротивление резисторов R1, R2.

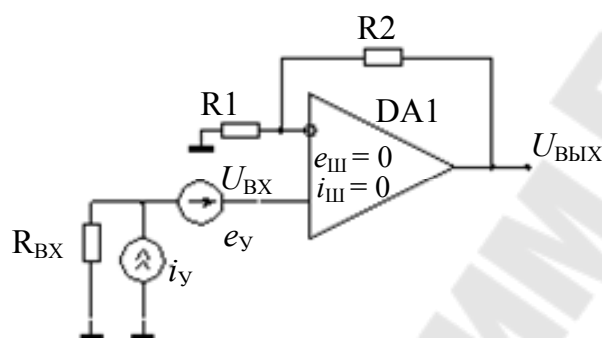


Рис. 10.2. Схема с приведенными ко входу шумовыми параметрами

Для схемы на рис. 10.2 напряжение на выходе будет определяться:

$$U_{\text{ВЫХ}2}^2 = k_{\text{УС}}^2 \cdot e_{\text{Y}}^2 \cdot B \quad \text{при } R_{\text{ВХ}} = 0 \quad (10.6)$$

и

$$U_{\text{ВЫХ}2\text{R}}^2 = k_{\text{УС}}^2 \cdot (e_{\text{Y}}^2 + (i_{\text{Y}} \cdot R)^2 + 4 \cdot k \cdot T \cdot R) \cdot B \quad \text{при } R \neq 0, \quad (10.7)$$

где k – коэффициент усиления ОУ в заданной полосе частот; B – полоса пропускания ОУ.

Формула (10.6) показывает напряжение на выходе схемы при нулевом сопротивлении $R_{\text{ВХ}}$. Так как $R_{\text{ВХ}} = 0$, то на выходе схемы будет отсутствовать токовая составляющая шума, что позволяет рассчитать по этой формуле e_y . Формула (10.7) показывает напряжение на выходе схемы при $R_{\text{ВХ}} \neq 0$, и на выходе присутствует напряжение и ток шума. Но так как приведенное напряжение шума рассчитано по формуле (10.6), то по формуле (10.7) рассчитать токовую составляющую шума.

Таким образом, используя эти формулы и проведя два измерения, можно рассчитать шумовые параметры ОУ, приведенные ко входу, а затем по формулам (10.4) и (10.5) рассчитать непосредственно шумовые параметры усилителя.

Кроме того, формулы (10.6) и (10.7) пригодны для расчета схем и из нескольких ОУ, включенных последовательно (например, для схем на рис. 10.4 и 10.5), только необходимо использовать при расчете коэффициент усиления всей схемы и полосу пропускания всей схемы.

Порядок расчета схемы на рис. 10.5 приведен ниже.

Исходные данные к расчету: $k, f_B, f_H, U_{ВЫХ2R}, U_{ВЫХ2}$,

где f_B, f_H – верхняя и нижняя частота фильтра (по уровню $\frac{\sqrt{2}}{2}$);

$U_{ВЫХ2R}, U_{ВЫХ2}$ – напряжение на выходе 2 схемы при разомкнутом и замкнутом сопротивлениях R соответственно.

1. Полоса пропускания B определяется: $B = f_B - f_H$.
2. По формуле (10.6) рассчитать e_y .
3. По формуле (10.7) рассчитать i_y .
4. По формуле (10.4) рассчитать $i_{ш}$.
5. По формуле (10.5) рассчитать $e_{ш}$.

Порядок выполнения работы

Работа выполняется в такой последовательности:

1. Установить в стенд плату с исследуемым ОУ.

Внимание!!! Данную операцию производить при выключенном источнике питания.

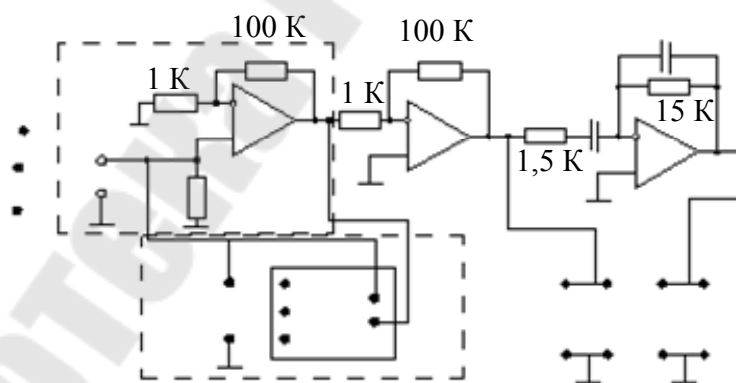


Рис. 10.3. Схема лабораторного макета

2. Измерить коэффициенты усиления схемы при частотах 100 Гц, 500 Гц, 900 Гц, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 15 кГц. Для этого необходимо собрать схему по рис. 10.4.

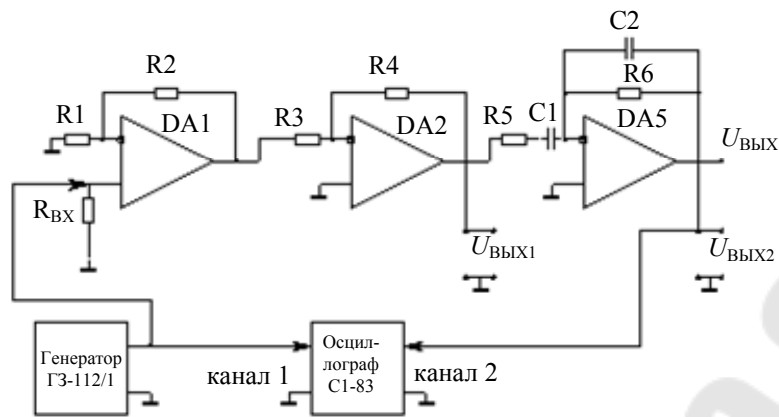


Рис. 10.4. Схема эксперимента для снятия амплитудно-частотной характеристики

Напряжение на входе установить такое, чтобы операционные усилители не входили в насыщение. Коэффициент усиления рассчитать по формуле:

$$k = \frac{U_{\text{ВЫХ2}}}{U_{\text{ВХ}}} \quad (10.8)$$

Построить АЧХ схемы и определить полосу пропускания схемы по уровню $\frac{\sqrt{2}}{2}$.

3. Измерить напряжение на выходе 2 при замкнутом и разомкнутом резисторе $R_{\text{ВХ}}$.

Для этого необходимо собрать схему по рис. 10.5.

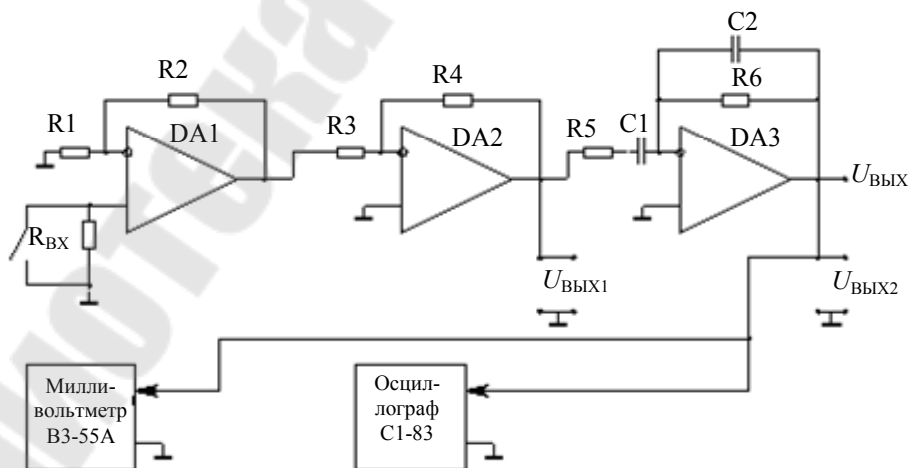


Рис. 10.5. Схема для определения шумовых параметров операционных усилителей

При измерении плату с исследуемым ОУ накрывать металлическим экраном.

В начале измерения предел измерения милливольтметра установить на максимум и переключать предел измерения в меньшую сторону до тех пор пока стрелка не окажется в середине шкалы. Затем считать показания милливольтметра.

4. Рассчитать эквивалентное напряжение шума и эквивалентный ток шума по пункту 0 и сравнить со справочными данными.

Значение сопротивлений $R_{ВХ}$ для различных плат ОУ и справочные данные шумовых параметров приведены в табл. 10.1.

Таблица 10.1

Тип операционного усилителя	$R_{ВХ}$, кОм	$e_{ш}, \frac{нВ}{\sqrt{Гц}}$	$i_{ш}, \frac{пА}{\sqrt{Гц}}$
К140УД608	5,6	—	—
К140УД17	10	38	—
К544УД2	10	—	—
К544УД1	2,2	—	—
К157УД2	4,7	—	—

5. Заменить плату с исследуемым ОУ и повторить пункты 1–4.

Измерить шумовые параметры для всех плат с ОУ. При повторном выполнении пункта достаточно измерить $K_{УС}$ только для частоты 5 кГц.

6. Данные результатов экспериментов и расчетов необходимо занести в табл. 10.2.

Таблица 10.2

№ п/п	Тип операционного усилителя	k (5 кГц)	$U_{ВЫХ2R}$, В	$U_{ВЫХ2}$, В	$e_{ш}, \frac{нВ}{\sqrt{Гц}}$	$i_{ш}, \frac{пА}{\sqrt{Гц}}$

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; выводы по результатам выполнения лабораторной работы.

Контрольные вопросы

1. Что такое «шум» и его вредное проявление.
2. Виды и происхождение шумов.
3. Шумовые параметры усилителей.
4. Расчет шумовых параметров усилителей.
5. Какие основные причины возникновения помех?
6. Какие существуют способы уменьшения уровня помех?

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ КОМПАРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы: научиться измерять статические и динамические характеристики интегральных компараторов напряжения (на примере К554СА3), рассчитывать схему компаратора с положительной обратной связью.

Используемое оборудование: блок питания ± 15 В; лабораторный макет на ИМС К554СА3; осциллограф С1-82; осциллограф С1-83; генератор ГЗ-112/1; вольтметр В7-40; комплект проводов.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Введение

Компараторы занимают промежуточное положение между аналоговыми и цифровыми микросхемами и являются простейшими АЦП. По массовости применения в микроэлектронной аппаратуре и номенклатуре компараторы уступают среди аналоговых микросхем только ОУ. Компараторы можно отнести к специализированным ОУ, в которых нормальным является нелинейный режим работы каскадов. Компараторы предназначены для сравнения входного сигнала с опорным. При этом в зависимости от того, больше входной сигнал опорного или меньше (на доли милливольт), на выходе компаратора за минимальное время должно установиться напряжение лог.0 или лог.1. Приемниками выходных сигналов компараторов обычно являются логические схемы. Поэтому выходные напряжения каждого компаратора согласуются с ТТЛ, ТЛЭС или КМОП-схемами.

В лабораторной работе исследуются статические и динамические характеристики интегрального компаратора К554СА3, имеющего следующие параметры:

$$E_{CM} = 3 \text{ мВ};$$

$$I_{BX} = 0,1 \text{ мкА};$$

$$\Delta I_{BX} = 0,01 \text{ мкА};$$

$$t_{3АД.ПЕР} = 200 \text{ нс.}$$

Измерение статических параметров компараторов

Статические параметры компараторов полностью аналогичны статическим параметрам ОУ.

В лабораторной работе измеряются напряжение смещения компаратора U_{CM} , ЭДС смещения E_{CM} , входные токи $I_{ВХ1}$ и $I_{ВХ2}$, разность входных токов $\Delta I_{ВХ}$.

Согласно ГОСТ 230–89 измерения этих параметров производятся по схеме, представленной на рис. 11.1, где DA1 – измеряемый компаратор, а DA2 – вспомогательный ОУ, называемый вспомогательное устройство балансировки (ВУБ). На выходе компаратора DA1 ВУБ поддерживает нулевое выходное напряжение с точностью собственного напряжения смещения и конечного коэффициента усиления.

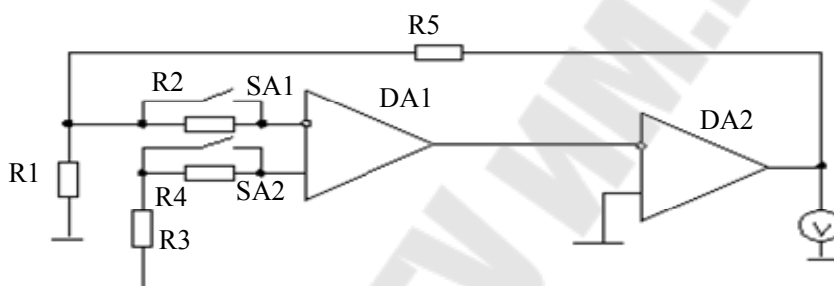


Рис. 11.1. Схема для измерения статических характеристик компараторов, операционных усилителей

В случае, когда SA1 и SA2 замкнуты, на выходе измеряемого компаратора должно появиться некоторое напряжение, обусловленное наличием на входе DA1 ЭДС смещения. Но за счёт отрицательной обратной связи (резистор R5), напряжение на выходе DA2 скомпенсирует ошибку от ЭДС смещения и на выходе DA1 будет поддерживаться нулевое выходное напряжение. Следовательно, напряжение в точке А равняется ЭДС смещения компаратора и противоположно по знаку. Таким образом, зная напряжение U_{X1} на выходе DA2, можно рассчитать ЭДС смещения компаратора:

$$E_{CM} = \frac{R_1}{R_1 + R_5} \cdot U_{X1}. \quad (11.1)$$

В случае, когда SA2 замкнут, а SA1 разомкнут, на входе компаратора DA1 дополнительно к ЭДС смещения появляется напряжение, обусловленное протеканием входного тока по сопротивлению R2. Напряжение на выходе ВУБ (DA2) U_{X2} скомпенсирует эту ошибку.

Таким образом, напряжение в точке А, с одной стороны, определяется выражением:

$$U_A = E_{CM} + I_{BX1} \cdot R_2, \quad (11.2)$$

а с другой стороны:

$$U_A = \frac{R_1}{R_1 + R_5} \cdot U_{X2}. \quad (11.3)$$

Из формулы (11.2), с учётом (11.3) и (11.1), найдём:

$$I_{BX1} = \frac{R_1}{R_1 + R_5} \cdot (U_{X2} - U_{X1}) \cdot \frac{1}{R_2}. \quad (11.4)$$

В случае, когда SA1 замкнут, а SA2 разомкнут, на входе компаратора DA1 дополнительно к ЭДС смещения появляется напряжение, обусловленное протеканием входного тока по сопротивлению R4. Аналогично I_{BX1} входной ток I_{BX2} определяется выражением:

$$I_{BX2} = \frac{R_1}{R_1 + R_5} \cdot (U_{X3} - U_{X1}) \cdot \frac{1}{R_4}, \quad (11.5)$$

где U_{X3} – напряжение на выходе ВУБ в данном случае.

В случае, когда SA1 и SA2 разомкнуты, на входе компаратора DA1 дополнительно к ЭДС смещения появляется напряжение, обусловленное протеканием входных токов по сопротивлениям R4 и R2. В случае равенства резисторов R2 и R4 это напряжение определяется $\Delta I_{BX} \cdot R2$ или $\Delta I_{BX} \cdot R1$.

Аналогично I_{BX1} и I_{BX2} , разность входных токов ΔI_{BX} определяется выражением:

$$\Delta I_{BX2} = \frac{R_1}{R_1 + R_5} \cdot (U_{X4} - U_{X1}) \cdot \frac{1}{R_4}, \quad (11.6)$$

где U_{X4} – напряжение на выходе ВУБ в данном случае.

Измерение динамических параметров компараторов

Быстродействие компараторов принято характеризовать временем переключения $T_{П}$. Это промежуток времени от начала сравнения до момента, когда выходное напряжение достигает порога срабатывания логической схемы или 50 % уровня (рис. 11.2). При использовании стандартной методики измерения, когда на один вход подаются прямоугольные импульсы амплитудой 100 мВ, а на другой вход –

постоянное напряжение в пределах 0–100 мВ, время T_{Π} отсчитывается с момента, когда величины постоянного и импульсного напряжения сравниваются. Разница между амплитудой прямоугольных импульсов и постоянного напряжения называется напряжением восстановления. Обычно время переключения приводится для напряжения восстановления $U_1 = 5$ мВ.

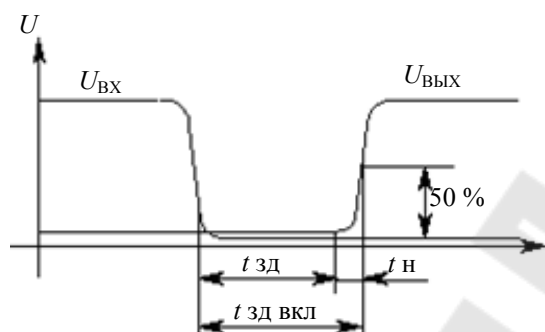


Рис. 11.2. Временные диаграммы включения компаратора

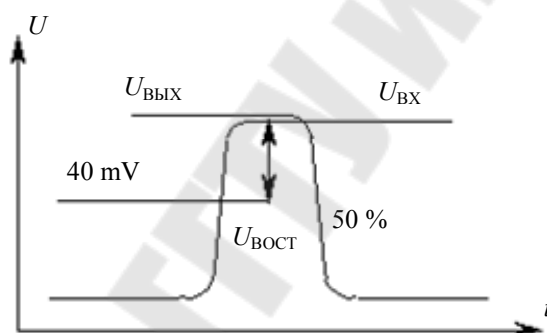


Рис. 11.3. Временные диаграммы выключения компаратора

Время переключения компараторов можно разбить на две составляющие: время задержки t_1 и время нарастания $t_{\text{н}}$ до порога срабатывания логической схемы или 50 % уровня (рис. 11.2). Используя для построения компаратора обычные ОУ без ОС, независимо от быстродействия последних, трудно получить время переключения меньше 1 мкс, причем основной его составляющей будет задержка. Объясняется это тем, что в режиме перегрузки нормальном для компаратора, как правило, насыщаются транзисторы усилительных каскадов ОУ. Поэтому после снятия перегрузки требуется значительное время для рассасывания накопленного в базах транзисторов заряда. Это является основной причиной разработки специализированных интегральных компараторов напряжения с временем переключения меньше 100 нс.

Компаратор с положительной обратной связью

Поскольку компараторы используются не как линейные усилители, а как ключевые устройства, в них может успешно применяться положительная обратная связь (ПОС), чтобы увеличить коэффициент усиления и получить некоторый гистерезис в переходной характеристике $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$.

Увеличение коэффициента усиления приводит к тому, что амплитуда входного напряжения, необходимого для переключения компаратора (относительно $U(H - L)$ и $U(L - H)$), сокращается до очень малой величины. Схема компаратора с ПОС представлена на рис. 11.4, а на рис. 11.5 представлена его переходная характеристика для некоторого $U_{\text{ОП}}$.

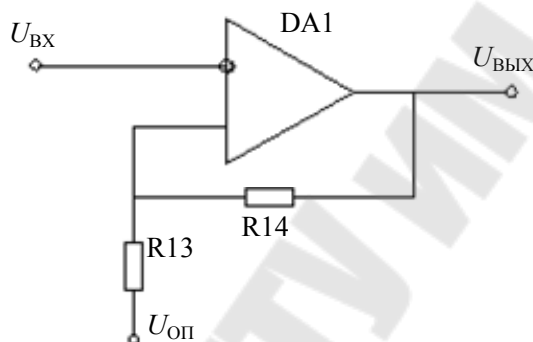


Рис. 11.4. Принципиальная схема компаратора с положительной обратной связью

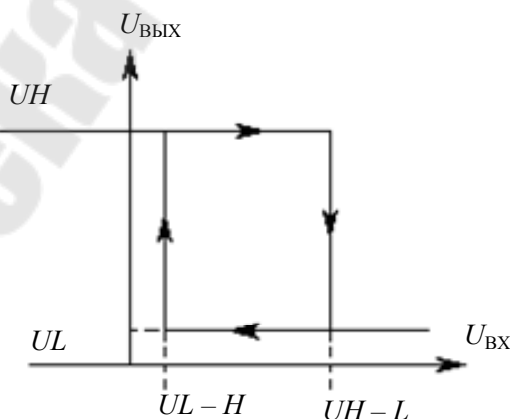


Рис. 11.5. Переходная характеристика компаратора с положительной обратной связью

Пороги переключения компаратора с ПОС определяются выражениями:

– при переключении из низкого уровня в высокий:

$$U(L - H) = \frac{U_{\text{ОП}} \cdot R_{14} + U_L \cdot R_{13}}{R_{14} + R_{13}}; \quad (11.7)$$

– при переключении из высокого уровня в низкий:

$$U(H - L) = \frac{U_{\text{ОП}} \cdot R_{14} + U_H \cdot R_{13}}{R_{14} + R_{13}}; \quad (11.8)$$

– ширина петли гистерезиса:

$$U_W = \frac{(U_H - U_L) \cdot R_{13}}{R_{14} + R_{13}}. \quad (11.9)$$

В ряде случаев наличие петли гистерезиса необходимо для исключения неопределённого момента переключения компаратора, т. е. предотвращения «дребезга», и повышает помехоустойчивость компаратора.

Порядок выполнения работы

Измерение статических характеристик компаратора:

1. Собрать схему по рис. 11.1 (рис. 2 на лабораторном макете).
2. Для различных положений переключателей SA1 и SA2 измерить напряжение на выходе ВУБ (DA2).
3. По формулам (11.1), (11.4), (11.5), (11.6) вычислить ЭДС смещения $E_{\text{СМ}}$, входные токи и разность входных токов:

$$(R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 3,01 \text{ кОм}, R_5 = 910 \text{ кОм}).$$

4. Сравнить полученные данные со справочными данными микросхемы K554СА3.

Измерение динамических характеристик компаратора:

1. Собрать схему по рис. 11.6.
2. Измерить время задержки включения компаратора $t_{\text{Зад.Вкл}}$ и его составляющих – время задержки $t_{\text{Зад}}$ и время нарастания $t_{\text{Нар}}$ для различных напряжений на входе компаратора: 10, 20, 40, 60 и 80 мВ.

Для этого необходимо получить осциллограмму, приведённую на рис. 11.2 (синхронизация осциллографа по отрицательному перепаду от сигнала на 1 канале).

Зарисовать в масштабе полученную осциллограмму.

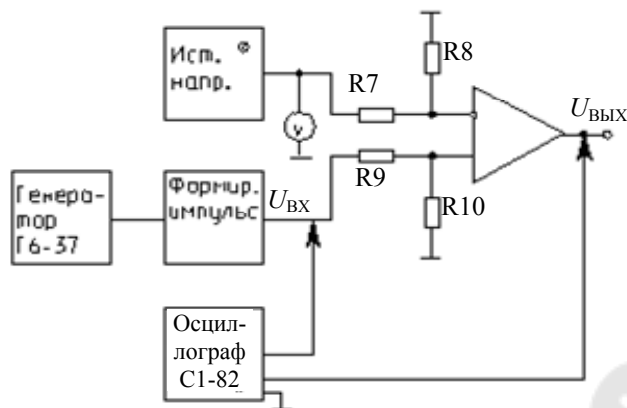


Рис. 11.6. Схема для измерения динамических параметров компараторов

Примечания: 1. Для избежания влияния вольтметра на вход компаратора и предотвращения генерации вольтметр включён через резистивный делитель R7R8 с коэффициентом деления $K = 59,28$. Следовательно, для установления требуемой величины напряжения на входе необходимо осуществить пересчёт по формуле: $U_{\text{ВОЛЬТ}} = U_{\text{ТРЕБ}} \cdot K$.

2. Резистивный делитель к формирователю импульсов ФИ подобран так, что импульсы на входе компаратора имеют амплитуду 100 мВ. Рекомендуется на осциллографе установить размах импульсов с ФИ 5 клеток и вести отсчёт исходя из того, что 1 клетка = 20 мВ.

3. При отсчёте длительности времени необходимо значение переключателя (ВРЕМЯ/ДЕЛ) уменьшать в 10 раз, если нажата кнопка (x 10).

3. Измерить время задержки выключения компаратора $t_{\text{ЗАД.ВЫКЛ}}$ и его составляющих – время задержки $t_{\text{ЗАД}}$ и время нарастания $t_{\text{НАР}}$ для различных напряжений на входе компаратора: 20, 40, 60, 80 и 90 мВ.

Для этого необходимо получить осциллограмму, приведённую на рис. 11.3 (синхронизация осциллографа по положительному перепаду от сигнала на 1 канале).

Зарисовать в масштабе полученную осциллограмму.

4. Результаты измерений по пунктам 2 и 3 свести в табл. 11.1.

Таблица 11.1

$U_{\text{ВОСТ}}, \text{ мВ}$	Включение			Выключение		
	$t_{\text{ЗД.ВКЛ}}, \text{ нс}$	$t_{\text{ЗД}}, \text{ нс}$	$t_{\text{НАР}}, \text{ нс}$	$t_{\text{ЗД.ВЫКЛ}}, \text{ нс}$	$t_{\text{ЗАД}}, \text{ нс}$	$t_{\text{НАР}}, \text{ нс}$
5						
10						
20						
40						
60						
80						

5. По результатам измерения построить графики $t_{\text{Зад.Вкл}} = f(U_{\text{Вост}})$ и $t_{\text{Зад.Выкл}} = f(U_{\text{Вост}})$.

6. По результатам опыта сделать вывод о зависимости $t_{\text{Зад.Пер}}$ от $U_{\text{Вост}}$.

Исследование компаратора с ПОС:

1. Собрать схему (рис. 3 на лабораторном макете);

2. Для заданного преподавателем $U_{\text{оп}}$ рассчитать по формулам (11.7), (11.8), (11.9) пороги переключения компаратора и ширину петли гистерезиса ($R_{14} = 110 \text{ кОм}$, $R_{13} = 14,9 \text{ кОм}$).

3. Установить заданное преподавателем значение напряжения $U_{\text{оп}}$. Подать на вход компаратора от генератора синусоидальный сигнал $f = 3\text{--}5 \text{ кГц}$. Подключить на вход компаратора 1 канал осциллографа С1-83, а 2 канал осциллографа С1-83 подключить на выход. Зарисовать в масштабе полученную осциллограмму, и по осциллограмме вычислить пороги переключения компаратора с ПОС.

4. Получить переходную характеристику компаратора с ПОС. Для этого на осциллографе С1-83 в переключателе СИНХРОНИЗАЦИЯ нажать кнопку (X-Y).

Зарисовать полученную осциллограмму в масштабе и по ней вычислить пороги переключения компаратора и ширину петли гистерезиса.

5. Сравнить полученные результаты по пунктам 3 и 4 с вычисленными в пункте 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; выводы по результатам выполнения лабораторной работы.

Контрольные вопросы

1. Какие функции выполняет компаратор напряжения?
2. Какие основные отличия схемотехники интегральных компараторов напряжения от схемотехники ОУ?
3. Что такое напряжение смещения, входные токи и разность входных токов ОУ или ИКН?
4. Как измеряется и вычисляется напряжение смещения по ГОСТу?

5. Как измеряются и вычисляются входные токи и разность входных токов по ГОСТу?

6. Что такое «время переключения компаратора»? Из каких составляющих оно складывается?

7. Как измеряется время переключения компараторов?

8. Какие основные методы повышения быстродействия компараторов?

9. В каких случаях применяются компараторы с ПОС?

10. Какую переходную характеристику имеет компаратор с ПОС? Как вычисляется ширина петли гистерезиса?

11. Как вычисляются пороги переключения компаратора с ПОС?

Литература

1. Коломбет, Е. А. Микроэлектронные средства обработки аналоговых сигналов / Е. А. Коломбет. – Москва : Радио и связь, 1991. – С. 159–180.

2. Соклоф, С. Аналоговые интегральные схемы / С. Соклоф. – Москва : Мир. – 1988. – С. 479–520.

3. Шило, В. Л. Линейные интегральные схемы / В. Л. Шило. – Москва : Советское радио, 1979. – С. 215–232.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ УСТРОЙСТВ ВЫБОРКИ И ХРАНЕНИЯ

Цель работы: ознакомиться с методикой исследования интегральных микросхем УВХ на примере КР1100СК2, научиться определять опытным путем основные параметры микросхем УВХ.

Используемое оборудование: блок питания ± 15 В; лабораторный макет на ИМС КР1100СК2; осциллограф С1-82; генератор ГЗ-112/1; вольтметр В7-40; комплект проводов.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Введение

В аналоговой технике элементами памяти, т. е. аналоговыми запоминающими устройствами, являются устройства выборки и хранения (УВХ) и амплитудные (пиковые) детекторы. Функция памяти состоит в хранении на запоминающем конденсаторе в течение некоторого времени мгновенного значения входного напряжения. Как правило, УВХ ставятся непосредственно перед АЦП и выполняют следующие функции:

– аналого-цифровое преобразование быстропеременных сигналов на достаточно медленных АЦП, т. к. изменение входного сигнала во время преобразования может привести к достаточно большой погрешности (см. также подраздел «апертурная задержка»);

– в режиме аналого-цифрового преобразования АЦП отключается от остальной схемы и подключен только к конденсатору УВХ, который в этом случае является еще и фильтрующим. Таким образом достигается лучшая помехозащищенность;

– если осуществлять выборку сигнала стробирующими импульсами постоянной длительностью, соизмеримой с временем $RC_{\text{хр}}$, то это эквивалентно фильтрации входного сигнала фильтром с определенной передаточной характеристикой (по форме передаточная характеристика аналогична цифровым фильтрам).

Параметры в режиме выборки

Время выборки. Это время, в течение которого образуется выборочное значение напряжения на накопительном элементе (конденсаторе) при переходе от режима хранения в режим выборки. Это время кроме схемотехнических особенностей зависит от таких внешних

факторов, как разница между хранящимся напряжением и выбираемым, емкость конденсатора хранения, требуемая точность установления. Поэтому, когда указывается время выборки, должны быть указаны и значения этих величин.

Погрешность коэффициента передачи в режиме выборки характеризует его отклонение от расчетного значения. Как правило, различают погрешности коэффициента передачи при работе с постоянным входным напряжением и с синусоидальным сигналом различной частоты.

Нелинейность амплитудной характеристики обусловлена отклонением коэффициента передачи от постоянного значения при изменении входного напряжения во всем динамическом диапазоне.

Дрейф коэффициента передачи характеризует изменение коэффициента передачи в зависимости от температуры, изменения номиналов источников питания, старения элементов и т. д.

Напряжение смещения представляет собой выходное напряжение схемы при стробировании нулевого сигнала, разделенное на коэффициент передачи.

Дрейф напряжения смещения определяется изменением напряжения смещения вследствие изменения температуры окружающей среды, питающих напряжений и т. д.

Время установления выходного напряжения – это максимальное время, необходимое для установления выходного напряжения с заданной точностью при воздействии на вход ступенчатого сигнала. Из-за переходных процессов в различных буферных и усилительных каскадах это время всегда больше времени выборки. Иногда пользуются понятием *скорости нарастания выходного напряжения*, как это делается для ОУ.

Параметры при переходе от выборки к запоминанию

Апертурная задержка. Возникновение апертурной погрешности связано с тем, что сопротивление реального ключа при переходе из режима выборки в режим хранения меняется не скачкообразно, а по какому-то определенному закону. После прихода управляющего напряжения на переход в режим хранения конденсатор не мгновенно отключается от входного напряжения: сопротивление ключа начинает постепенно возрастать. И в течение этого времени, до того как сопротивление ключа достигнет бесконечности, входное напряжение будет воздействовать на напряжение на конденсаторе, но уже по какому-то

более сложному закону (зависит от закона изменения сопротивления ключа при размыкании и от закона изменения входного напряжения).

Погрешность переключения при образовании выборочного значения обусловлена прохождением части управляющих стробирующих импульсов через межэлектродные емкости используемых аналоговых ключей. Погрешность переключения также носит название коммутационной ошибки, или напряжения переноса заряда.

Погрешность, связанная с диэлектрической поляризацией, при образовании выборочного значения возникает за счет процессов, происходящих в диэлектрике накопительного конденсатора.

Время установления в режиме хранения определяет время, в течение которого завершаются переходные процессы на накопительном конденсаторе при переходе из режима выборки в режим хранения. Сумма времени установления и апертурной задержки полностью определяет время перехода от выборки к хранению.

Параметры в режиме запоминания

Спад выходного напряжения – характеризует основную составляющую погрешности устройства в режиме запоминания. Он определяется скоростью разряда накопительного конденсатора:

$$\frac{\partial U_C}{\partial t} = \frac{I}{C_H},$$

где I – сумма токов утечки ключа, тока смещения усилителя и токов утечки на шины питания и земляную. Как правило, основной составляющей тока I является суммарный ток утечки ключа. Спад выходного напряжения определяет время хранения устройства с допустимой погрешностью.

Сквозное прохождение обусловлено той частью входного сигнала, которая попадает на выход через емкостной делитель, образованный проходной емкостью разомкнутого ключа и накопительным конденсатором. Часто этот параметр выражают в децибелах как отношение напряжения сквозного прохождения для входного синусоидального сигнала определенной амплитуды и частоты к амплитуде этого сигнала на входе устройства.

Порядок выполнения работы

Работа выполняется в такой последовательности:

1. Установить переключатель SA1 в положение «1». Подключить источник питания к макету с соблюдением полярности.

2. Измерить напряжение смещения УВХ цифровым вольтметром, для чего необходимо заземлить вход УВХ и установить режим выборки путем подачи напряжения управления +6 В на вывод управления УВХ «С1».

3. Замкнув цепь балансировки, произвести балансировку УВХ.

4. Собрать схему по рис. 12.1. Установить амплитуду двухполярных импульсов генератора – 6 В. Произвести измерение напряжения переноса заряда для $C_{xp} = 1$ нФ и $C_{xp} = 10$ нФ при частотах сигнала управления 100 Гц, 1 и 10 кГц.

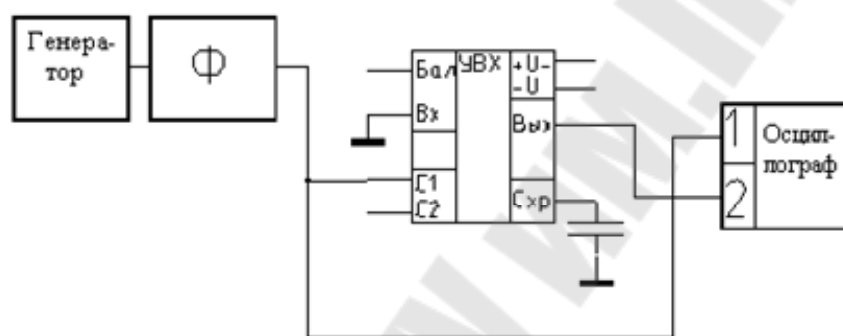


Рис. 12.1. Схема для измерения напряжения переноса заряда

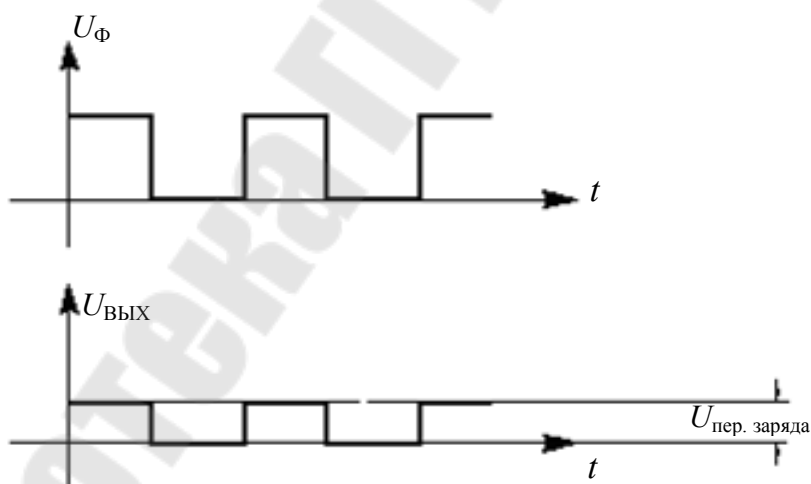


Рис. 12.2. Временные диаграммы переноса заряда (коммутационная ошибка)

5. Собрать схему по рис. 12.3. По рис. 12.4 установить $C_{xp} = 1$ нФ, амплитуду двухполярных импульсов генератора – 5 В, частоту следования импульсов – 1 кГц, временную зависимость между импульсами генератора и формирователя Ф регуляторами t_3 и $t_и$ формирователя.

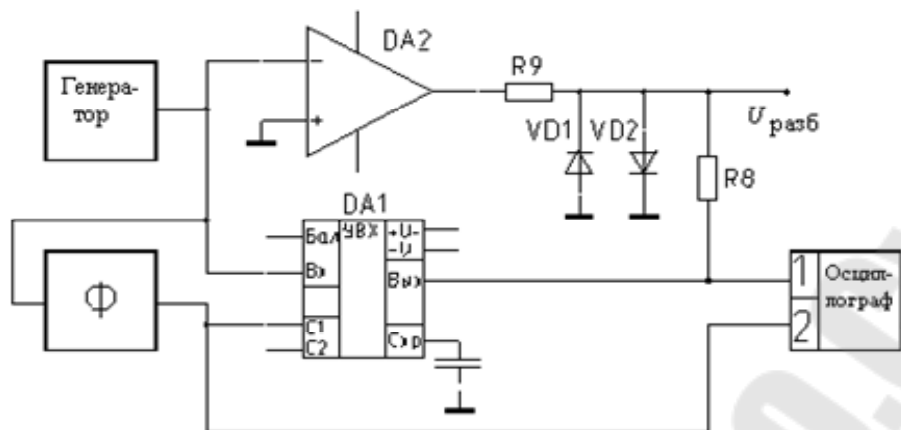


Рис. 12.3. Схема для измерения времени выборки и его составляющих

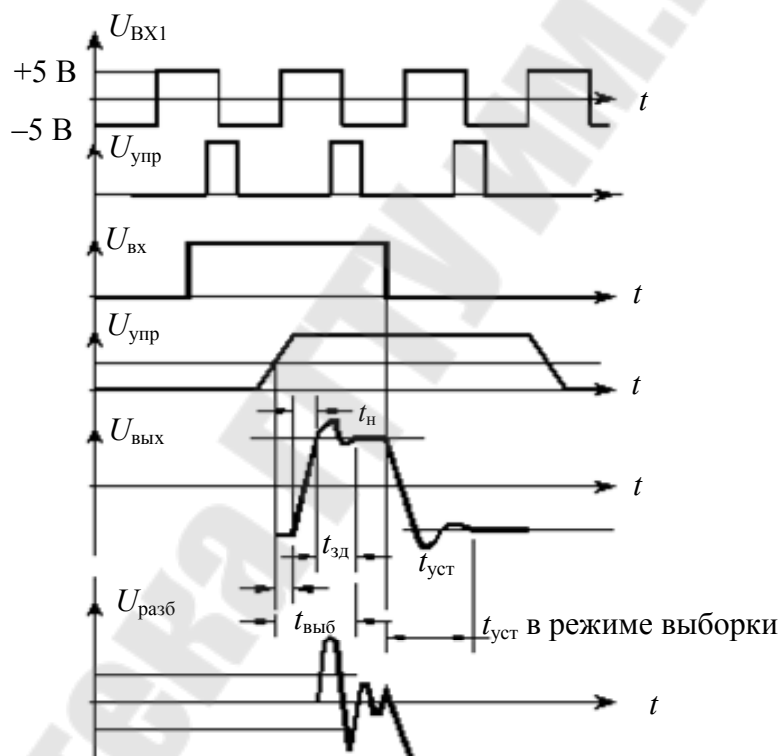


Рис. 12.4. Временные диаграммы при измерении времени выборки и его составляющих при напряжении +5 В

6. Измерить время выборки УВХ ($t_{\text{выб}}$) и его составляющие – время задержки ($t_{\text{зад}}$), время нарастания ($t_{\text{нар}}$), время установления ($t_{\text{уст}}$) для $U_{\text{выб}} = +5$ В. Синхронизируясь по положительному фронту сигнала управления, произвести измерение t_3 – по осциллограмме выходного напряжения УВХ, а $t_{\text{выб}}$, $t_{\text{нар}}$, $t_{\text{уст}}$ – по осциллограмме напряжения разбаланса компенсирующего делителя R8R9 при точности установки

2,5 мВ относительно установившегося значения, что соответствует точности установки выходного напряжения $U_{ВХ} - 0,1\%$ (рис. 12.4).

7. Установить $C_{хр} = 10$ нФ и повторить измерения по пункту 6.

8. Измерить $t_{выб}$ и его составляющие для $U_{выб} = -5$ В, $C_{хр} = 1$ нФ и $C_{хр} = 10$ нФ.

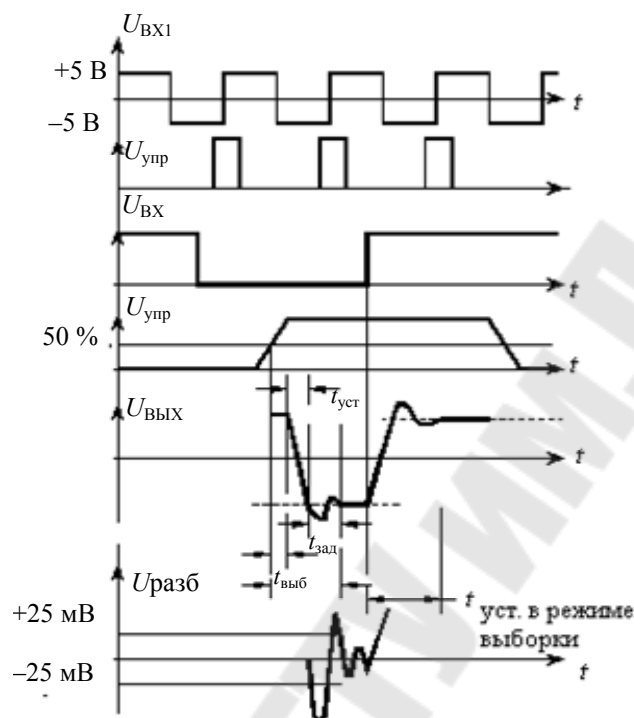


Рис. 12.5. Временные диаграммы при измерении времени выборки при напряжении -5 В

9. Используя данные измерений по пунктам 6–8, рассчитать зарядный ток конденсатора $C_{хр}$.

10. Собрать схему по рис. 12.6. Установить максимальное значение t_3 и $t_{и}$ формирователя Φ , амплитуду двухполярных импульсов генератора -5 В. Регулировкой источника напряжения $+5$ В скомпенсировать постоянную составляющую на выходе делителя R8R9. Измерить скорость изменения выходного напряжения в режиме хранения для $C_{хр} = 1$ нФ и $C_{хр} = 10$ нФ при выборке напряжения $+5$ В (напряжение $U_{ВХ1}$ на рис. 12.7). Частота следования двухполярных импульсов генератора выбирается в зависимости от реального значения измеряемого параметра в диапазоне $0,1-100$ Гц. При необходимости пользуйтесь ждущим режимом синхронизации развертки.

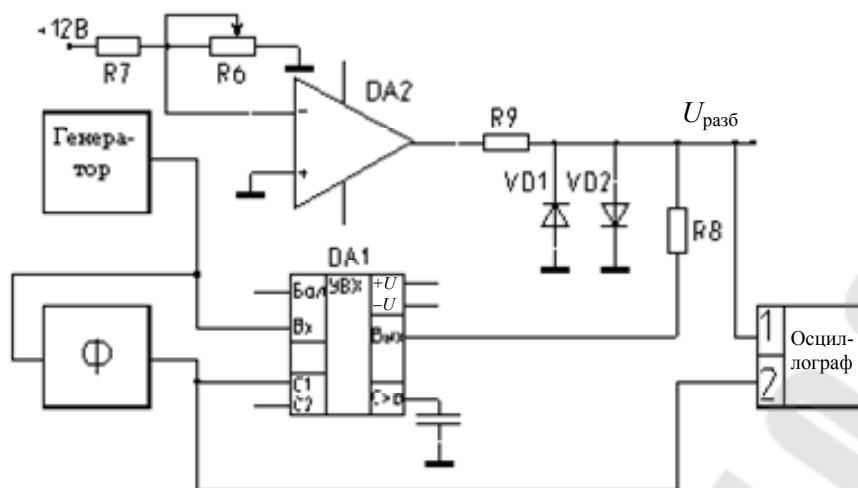


Рис. 12.6. Схема для измерения скорости изменения выходного напряжения в режиме хранения

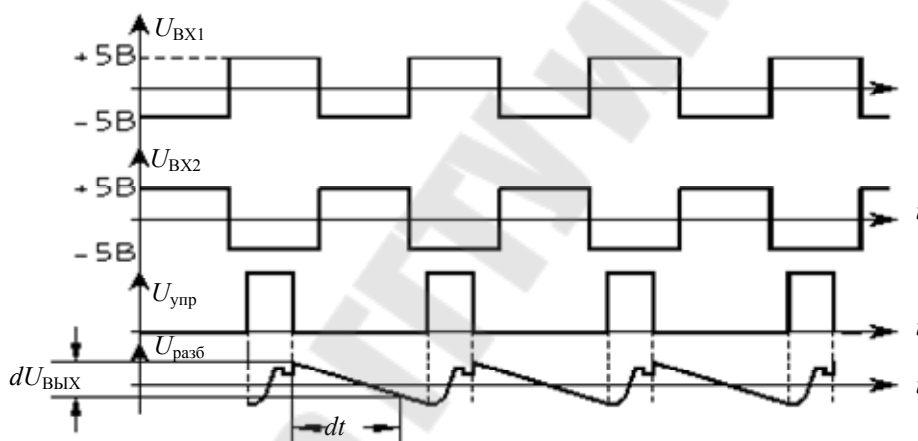


Рис. 12.7. Временные диаграммы для измерения скорости изменения выходного напряжения в режиме хранения

11. Собрать схему по рис. 12.6. Измерить скорость изменения выходного напряжения в режиме хранения для $C_{\text{хр}} = 1 \text{ нФ}$ и $C_{\text{хр}} = 10 \text{ нФ}$ при выборке напряжения -5 В (напряжение $U_{\text{ВХ2}}$ на рис. 12.7).

12. Измерить прямое прохождение сигнала в режиме хранения, для чего необходимо собрать схему по рис. 12.8, временные диаграммы представлены на рис. 12.9. Частота импульсов генератора – 1 кГц . Рассчитать коэффициент ослабления входного сигнала УВХ в режиме хранения.

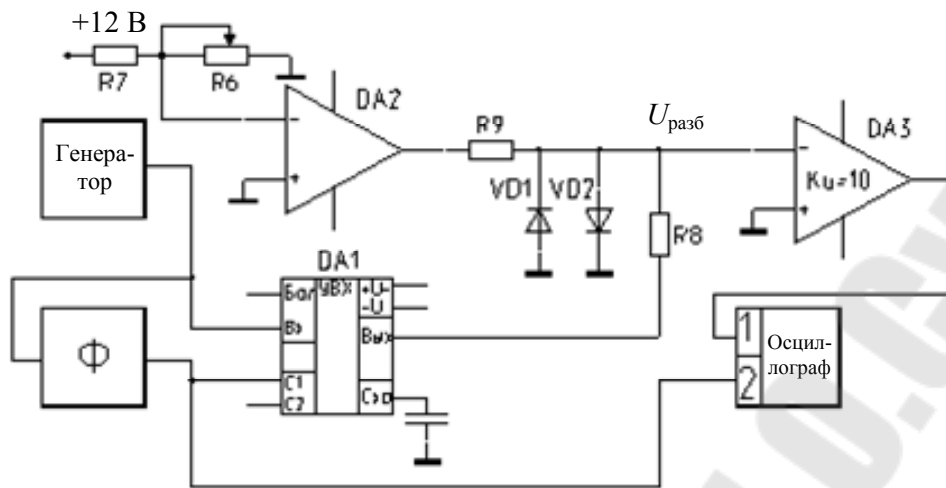


Рис. 12.8. Схема для измерения прямого прохождения сигнала в режиме хранения

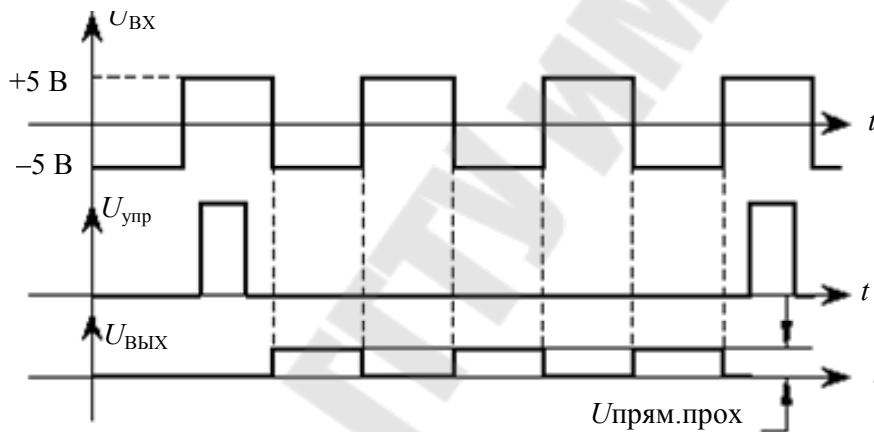


Рис. 12.9. Временные диаграммы при измерении прямого прохождения сигнала в режиме хранения

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; выводы по результатам выполнения лабораторной работы.

Контрольные вопросы

1. Какие функции выполняет УВХ?
2. Какими параметрами характеризуется УВХ в режиме выборки?

3. Какими параметрами характеризуется УВХ при переходе из режима выборки в режим хранения?
4. Какими параметрами характеризуется УВХ в режиме хранения?
5. Как связаны точность и быстродействие УВХ?
6. Схема простейшего УВХ.
7. Структурная схема УВХ 1100СК2.

Содержание

Лабораторная работа № 10. Исследование шумовых параметров операционных усилителей	3
Лабораторная работа № 11. Исследование интегральных компараторов напряжения.....	12
Лабораторная работа № 12. Исследование интегральных микросхем устройств выборки и хранения	21

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ И КОМПАРАТОРЫ

Лабораторный практикум

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

Электронный аналог печатного издания

Автор-составитель: **Захаренко** Леонид Александрович

Редактор *Н. Г. Мансурова*
Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 02.05.07.

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

Цифровая печать. Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,58.

Изд. № 23.

E-mail: 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.