

Аналоговая схемотехника

Схемотехника

Введение

Многие электронные устройства--датчики температуры, давления и многих других физических величин,--являются источниками аналоговых сигналов. Управление многими устройствами, например, двигателями, часто осуществляется в аналоговой форме. Поэтому, несмотря на то, что большинство вычислительных и управляющих комплексов являются числовыми, необходима обработка и преобразование аналоговых сигналов. Аналоговая техника постоянно совершенствуется, и рынок аналоговых элементов и устройств постоянно растет как по объему используемых устройств, так и по номенклатуре.

1 Операционные усилители

1.1 Общие сведения

Операционный усилитель (ОУ) был разработан для выполнения математических операций в аналоговых вычислительных машинах. Первый ОУ был выполнен в 1942 году на лампах, имел большие размеры и был достаточно дорогим. Переход к транзисторам вызвал резкое уменьшение размеров, увеличение надежности и уменьшение стоимости. Переход к интегральным микросхемам (отечественный аналог 140УД1) несмотря на существенные недостатки вызвал широкое применение и высокий спрос на рынке. ОУ 153УД1 был лишен большого количества недостатков и применяется до сих пор. Разработанные позже ОУ (LM101 и LM 101A--отечественные аналоги 153УД2 и 153УД6) не требовали внешних цепей защиты, в них использовались многие новинки, в том числе многоэмиттерные и многоколлекторные транзисторы, использование их стало проще и удобней.

ОУ представляет собой дифференциальный усилитель постоянного тока с двумя входами, большим коэффициентом усиления и малыми токами смещения. Благодаря малым размерам, высокому коэффициенту усиления, почти идеальным характеристикам (за счет интегрального исполнения), свойства усилителя определяются, в основном, внешними цепями. Схемы зачастую выгодно выполнять на ОУ вместо транзисторов.

Обозначение ОУ показано на рис. 1. Первоначально ОУ изображался по варианту а). Входы усилителя изображались слева, выходы--справа, а цепи питания и корректирующие цепи -- на боковых линиях. Такое обозначение можно встретить в литературе и в документации.

Рисунок 1 ГОСТ 2.759-82 требует обозначений по вариантам б) и в). Входы обозначаются слева, выходы -справа, в центральном поле-символ усилителя и выполняемая функция, на боковых полях обозначение входов и выходов и их функции. Вариант б) это упрощенное обозначение ОУ.

ОУ имеет два равнозначных входа U_1 и U_2 . Но для определенности один из входов называется прямым, другой - инверсным. Инверсный вход обозначается кружочком, знаком - (минус), или символом n (negative). Прямой вход обозначается знаком + (плюс), символом p (positive) или вообще не имеет символа.

Выходное напряжение пропорционально разности входных напряжений. Чтобы по фазе оно соответствовало прямому входу, принято считать

$U_{\text{вых}} = KU (U_1 - U_2)$ (или $U_{\text{out}} = KU (U_p - U_n)$, или $U_{\text{вых}} = KU (U_{\text{пр}} - U_{\text{инв}})$).

Коэффициент усиления KV называется дифференциальным коэффициентом усиления. В реальных ОУ $KV = 10^3 \dots 30 \cdot 10^6$. Напряжение $(U_{\text{пр}} - U_{\text{инв}})$ называют дифференциальным входным напряжением; напряжение называют синфазным входным напряжением (синфазное входное напряжение рассматривалось при изучении балансных усилителей в курсе «Промышленная электроника»).

Чтобы обеспечить возможность работы ОУ с разнополярными напряжениями, используются два источника питания. Плюс одного источника подключается к входу питания «плюс ОУ», минус другого источника -- к входу питания «минус ОУ».

Источники имеют общую точку, относительно которой выдается выходной сигнал ОУ.

Большинство ОУ имеют питание $\pm 15V$, однако имеется множество усилителей, питающихся самыми разными напряжениями, вплоть до однополярных. Обычно цепи питания усилителей в схемах не показываются, но в левом нижнем углу чертежа помещается таблица питания, в которой указывается напряжение, которое подключается к соответствующему выводу микросхемы

Имея огромный коэффициент усиления KU , ОУ может иметь весьма ограниченное применение. Поэтому его охватывают отрицательной обратной связью (ООС). Цепь ОС имеет коэффициент передачи v . На вход цепи ОС подается выходной сигнал $U_{\text{вых}}$ усилителя с ОС. На вход усилителя подается сигнал $DU = U_{\text{вх}} - vU_{\text{вых}}$. Поэтому Рисунок 2 $U_{\text{вых}} = KU DU = KU(U_{\text{вх}} - vU_{\text{вых}}) = KU U_{\text{вх}} - KU v U_{\text{вых}}$

$U_{\text{вых}} + Kv v U_{\text{вых}} = KU U_{\text{вх}}$, откуда коэффициент усиления усилителя, охваченного ОС, $K = \frac{KU}{1 + Kv v} \approx KU$ (1)

В знаменателе выражения 1) первым слагаемым можно пренебречь вследствие того, что KU очень велико, а $v = 0,01 \dots 1$. Поэтому

$K \approx KU$ (2)

Из выражения 2) следует, что

коэффициент усиления усилителя с ОС не зависит от коэффициента усиления усилителя и определяется, в основном, цепью ОС!

Из этого следует еще один важный вывод: изменяя элементы цепи ОС, можно изменять качества усилителя--линейность, коэффициент усиления, осуществлять нелинейные преобразования и т.д.

1.2 Основные схемы включения ОУ

Так как ОУ имеет два входа, его можно использовать для усиления одного сигнала, подключенного к одному из входов (прямому или инверсному), или для усиления разности двух сигналов, подключенных к обоим входам. Во всех случаях входные и

выходные напряжения должны измеряться относительно некоторой общей шины, в качестве которой можно использовать, например, корпус. Как было показано выше, необходимо использовать ООС. Имеется три возможности включения ОУ, которые будут рассмотрены ниже. При этом будут приняты следующие допущения.

1 Входные сопротивления ОУ равны бесконечности, а входные токи равны нулю.

2 При наличии ООС напряжения на входах ОУ одинаковы. Это легко доказать: если они неодинаковы, то выходное напряжение будет изменяться до тех пор, пока напряжения уравниваются (следует заметить, что это качество не относится к ПОС).

3 При равных сигналах на входах, напряжение на выходе равно нулю (в реальности добиться равенства входных сигналов очень трудно, а внутренние цепи усилителя дают смещение нуля).

1.2.1 Неинвертирующее включение

Входной сигнал подается на прямой вход. Организовать ООС по этому входу невозможно, так как она будет положительной. ООС создается по инверсному входу, как показано на рисунке 3. На инвертирующий вход подается напряжение R_2 . Это напряжение должно быть равным напряжению на неинвертирующем входе, т.е.

$$U_{вх} = R_2.$$

Рисунок 3 Отсюда коэффициент усиления неинвертирующего усилителя

$$K = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad 3)$$

Выражение 3) говорит о том, что коэффициент усиления неинвертирующего усилителя больше 1. При $R_2 = 0$ (инвертирующий вход отсоединен от общей шины и присоединен к выходу) независимо от величины R_1 $K = 1$. Усилитель, в котором выход присоединен к инвертирующему входу является повторителем напряжения, так как в этом случае $K = 1$.

Повторители выпускаются в виде микросхем. В одном корпусе размещается четыре и более повторителей.

1.2.2 Инвертирующее включение

Входной сигнал подается на инвертирующий вход. По этому же входу организуется ООС через сопротивление R_2 . Прямой вход подключается к общей шине (см рис. 4).

Ток усилителя по инвертирующему входу равен нулю. В сопротивлениях R_1 и R_2 возникает ток за счет разности напряжений $U_{вх}$ и $U_{вых}$. На

инвертирующем входе усилителя напряжение равно $U_{вх} - iR_1$. Оно же равно $U_{вых} + iR_2$. И оно же равно напряжению на неинвертирующем входе, т.е. нулю.

$$U_{вх} - iR_1 = U_{вых} + iR_2 = 0.$$

$$U_{вх} - iR_1 = 0, U_{вх} = iR_1$$

$$U_{вых} + iR_2 = 0, U_{вых} = -iR_2.$$

$$K = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = -\frac{R_2}{R_1} \quad 4)$$

Их выражения 4) следует, что а) выходное напряжение находится в противофазе к входному; б) коэффициент усиления может быть как больше, так и меньше единицы.

Так как напряжение на инвертирующем входе равно нулю, входной ток схемы

$$I =$$

т.е. входным сопротивлением ОУ с ООС является R_1 . Чтобы получить усилитель с высоким коэффициентом усиления K , необходимо уменьшить R_1 (см. 4)). Но тогда

уменьшается входное сопротивление. Можно увеличить R_2 , но это приводит к нестабильности ОУ. Чтобы получить усилитель с большим коэффициентом усиления и высоким входным сопротивлением, используют специальные схемы цепи ОС (см. [3]).

Схема позволяет суммировать несколько входных напряжений: так как напряжение на инвертирующем входе равно нулю, $i_1 + i_2 = i$.

$$i_1 = i_2 = i, \text{ т.е.}$$

$$+ = - .$$

Из выражения следует, что напряжения суммируются обратно пропорционально входным сопротивлениям. Если ,

$$+ = - 5)$$

Суммирование входных напряжений можно выполнить и без инвертирования, складывая напряжения на неинвертирующем входе.

1.2.3 Дифференциальное включение

ООС создается по цепям инвертирующего входа, а неинвертирующий вход в общем случае должен подключаться с помощью резисторов.

Чтобы определить дифференциальный коэффициент усиления, можно провести следующие рассуждения.

За счет ООС напряжения на инвертирующем и на неинвертирующем входах одинаковы. Рисунок 6 Пусть напряжение на неинвертирующем входе U_p . Тогда напряжение на инвертирующем входе тоже U_p . Входной ток по инвертирующему входу $i_1 =$.

Этот же ток протекает по сопротивлению R_4 , так как входное сопротивление равно бесконечности: $i_1 =$, откуда = ,

$$(U_1 - U_p)R_4 = (U_p - U_{\text{вых}})R_1,$$

$$U_{\text{вых}}R_1 = U_p R_1 - U_1 R_4 + U_p R_4 = U_p(R_1 + R_4) - U_1 R_4.$$

U_p можно найти по соотношениям на неинвертирующем входе:

$$U_p = R_3.$$

$$U_{\text{вых}}R_1 = R_3(R_1 + R_4) - U_1 R_4, \text{ откуда } U_{\text{вых}} = -U_1. 5)$$

Из выражения 5) можно сделать следующие выводы.

1 При наличии всех сопротивлений $R_1 \dots R_4$ выходное напряжение вычисляется достаточно сложно.

2 При $R_3 =$ (отсутствует гальваническая связь неинвертирующего входа с общим проводом) $U_{\text{вых}} = -U_1$.

3 Интересно определить, при каких соотношениях сопротивлений $U_{\text{вых}}$ будет зависеть только от разности $-V_1$.

$$U_{\text{вых}} = -U_1 = -U_1).$$

Для выполнения поставленного условия необходимо, чтобы $=1$, т.е.

$$= , \text{ или}$$

$$= 6)$$

1.3 Параметры ОУ

Параметры ОУ можно разбить на три группы: точностные, динамические и эксплуатационные.

Действие точностных параметров выражается в том, что при заданных входных сигналах выходные сигналы отличаются от расчетных. Ниже перечислены наиболее важные параметры и описано их влияние.

- а) Дифференциальный коэффициент усиления. Погрешность ОУ обратно пропорциональна коэффициенту петлевого усиления (V_{KU}). Чем больше коэффициенты усиления, тем выше погрешность. Коэффициент усиления существенно зависит от входного сопротивления последующего каскада.
 - б) Ослабление синфазного входного сигнала определяется сигналом, приведенным ко входу усилителя. Коэффициент ослабления синфазного сигнала показывает, какое значение дифференциального входного напряжения следует приложить ко входу усилителя, чтобы скомпенсировать усиление синфазного сигнала.
 - в) Смещение нуля ОУ проявляется в наличии постоянного выходного напряжения при отсутствии напряжений на входе. Чтобы привести смещение нуля ко входу, смещение выходного напряжения умножают на коэффициент передачи в звена ОС. Смещение нуля обусловлено, в основном, двумя причинами: разбросом параметров транзисторов балансного каскада и разностью входных токов. Что касается второй причины, она может быть устранена, как правило, правильным подбором входных сопротивлений. Для устранения первой причины фирмы, выпускающие ОУ, применяют различные схемотехнические решения, вплоть до установки внутренних ЦАП для определения и компенсации сдвига нуля. В некоторых ОУ имеются входы, к которым подключаются внешние элементы для подстройки. Схемотехнические решения позволяют снизить смещение нуля до 10 мкВ в усилителях с биполярными транзисторами на входе и до 100 мкВ с полевыми транзисторами на входе (усилители предыдущих поколений имели соответствующие показатели $-(0,1...5)$ МВ и $(0,5...20)$ мВ).
- Важное значение имеет также временной дрейф, который определяется как приращение изменения смещения за месяц или за 1000 ч работы.
- г) Коэффициент подавления нестабильности питания определяют как отношение статического изменения напряжения источника питания (обычно на 1В) к приведенному ко входу ОУ изменению выходного напряжения, вызванного этим изменением. С ростом пульсаций напряжения питания коэффициент подавления нестабильности уменьшается. Для повышения стабильности между каждым из выводов питания и общей точкой устанавливают электролитические конденсаторы с емкостью 2,2 мкФ и керамические конденсаторы 0,1 мкФ. Керамические конденсаторы устанавливают как можно ближе к корпусу ОУ.
 - д) Шумы ОУ накладываясь на полезный сигнал, вызывают искажения, погрешности. Различают внешние и внутренние шумы. С внешними шумами борются с помощью фильтров, рациональным размещением элементов и линий связи, экранированием и т.д. Внутренние шумы возникают в результате различных эффектов (чаще всего тепловых), влияющих на работу компонентов электронного устройства. Полевые транзисторы обладают меньшим по сравнению с биполярными уровнем

шума.

Чтобы оценить уровень шума вводится понятие коэффициент шума.

Коэффициент шума показывает во сколько раз отношение мощности шума к мощности сигнала на выходе усилителя больше аналогичного отношения на входе. Динамические параметры характеризуют быстродействие ОУ. Они условно разделяются на параметры малого сигнала (например, полоса пропускания, время установления) и параметры большого сигнала (например, скорость нарастания выходного напряжения). Параметры малого сигнала рассматриваются при выходном сигнале $\approx 1\text{В}$; параметры большого сигнала рассматривают при входном сигнале K эксплуатационным параметрам относятся: номинальное значение питающего напряжения; допустимый диапазон питающих напряжений; ток, потребляемый от источника питания; максимальный выходной ток и т.д.

1.4 Типы операционных усилителей

В мире выпускаются сотни наименований ОУ, которые можно классифицировать по различным признакам. С точки зрения внутренней схемотехники ОУ можно разделить на биполярные, биполярно-полевые и КМОП (комплементарных полевых транзисторах с изолированным затвором). В биполярно-полевых ОУ полевые транзисторы обычно используются в дифференциальных входных каскадах для увеличения входного сопротивления и уменьшения входных токов.

Усилители общего назначения это дешевые усилители среднего быстродействия и малой выходной мощности. Обычные параметры: Дифференциальный коэффициент усиления $K_U = 20000 \dots 200000$, напряжение смещения нуля, приведенное ко входу, $U_{см} = 0,1 \dots 10\text{мВ}$, частота входного сигнала $0,1 \dots 10\text{МГц}$. Типичными представителями таких ОУ являются: 140УД6, 149УД8, 153УД6, LF411.

Быстродействующие усилители при средней точности имеют высокие динамические характеристики. Типичные представители таких усилителей являются: 573УД3, 154УД4, AD825, AD8042, LM6165.

Прецизионные усилители имеют высокий дифференциальный коэффициент усиления по напряжению, малый дрейф нуля, малые входные токи и, как правило, невысокое быстродействие. Отличаются способами устранения дрейфа нуля. Типичными представителями являются: 140УД24, 140УД26, AD707, MAX400M, MAX430, AD8571.

Микромощные ОУ отличаются малым потреблением энергии. Появился целый класс ОУ, питающихся от напряжения 3В, потребляющих наноамперный ток! Остальные параметры обычно невысокие. Примеры: TLV2401, LMC6442. Такие усилители могут непрерывно работать десятки лет от одной литиевой батарейки!

Чтобы дать возможность разработчику найти компромисс между потреблением и быстродействием, разработаны программируемые ОУ, в которых имеется специальный вывод для присоединения резистора. Изменяя сопротивление резистора, приводит к увеличению тока потребления и увеличению быстродействия или наоборот: снижению быстродействия за счет уменьшения потребления. Примеры: 140УД12, 1407УД2.

При однополярном источнике сигнала (например, датчик с однополярным

питанием) удобно применять и усилители с однополярным питанием. Такие усилители рассмотрены ниже.

Многие усилители выпускаются в виде микросхем, имеющих на одном кристалле несколько однотипных ОУ. Примеры: 140УД20 имеет в своем составе два ОУ с параметрами 140УД7, МАХ407-- два усилителя типа МАХ406; МАХ409--четыре таких усилителя.

Высоковольтные и мощные ОУ имеют разность питающих напряжений более 50 В. Сложность выпуска таких ОУ связана с трудностью выполнения высоковольтных транзисторов и создания необходимой изоляции между элементами в кристалле. Поэтому большинство ОУ с питанием выше 100В изготавливается в гибридном исполнении.

ОУ общего применения имеют выходной ток до 5мА. К мощным относят усилители с выходным током более 100мА. Существуют ОУ, способные выдавать в нагрузку ток до 100 А и более.

1.5 Однополярное питание ОУ

Схемы с однополярным питанием позволяют упростить источник питания и повысить экономичность устройства. В таких устройствах имеется возможность установить напряжение питания 5В и ниже. На снимке изображен инвертирующий усилитель с однополярным питанием. Видно, что отрицательный полюс источника подключен к нулевой (общей) шине. Если входной сигнал однополярный, он также подключается к общей шине. Важно соблюсти полярность подключения. Дело в том, что сигнал на инвертирующем входе должен быть меньше сигнала на неинвертирующем.

В этом случае $U_{вых} > 0$. В противном случае вследствие

Рисунок 7 отсутствия источника питания отрицательной полярности схема работать не будет. В случае двухполярного сигнала или невозможности подключения источника сигнала к общей шине приходится ввести искусственное смещение сигнала или искусственную нулевую точку.

Смысл искусственного смещения показан на рис. На вход подается напряжение смещения $U_{см}$ такое, чтобы весь сигнал расположился в диапазоне напряжения одной полярности. Там же показана одна из схем для усиления синусоидального сигнала с помощью неинвертирующего усилителя с однополярным питанием. Смещение задается с помощью делителя на сопротивлениях R_2 , R_3 . Величина смещения зависит от соотношения между R_2 и R_3 . Если $R_2 = R_3$, смещение будет равно половине напряжения питания. Сопротивления R_2 и R_3 должны быть достаточно большими, чтобы не нагружать источники питания и входного сигнала.

Рисунок 8

При двухполярном питании оба напряжения питания расположены в обе стороны от нулевой точки, относительно которой задается и входной сигнал. При однополярном питании нулевую точку можно расположить приблизительно в середине величины напряжения питания. Эту точку получают искусственно. Существует много схем создания искусственных нулевых точек. Одна из них позволяет получить напряжение искусственной точки с помощью стабилитрона. В схеме напряжение

Выход на нагрузке R_n создается относительно искусственной нулевой точки, напряжение которой определяется напряжением стабилитрона V_D . Входное напряжение $V_{вх}$ также задается относительно этой нулевой точки. Каждая из схем имеет свои достоинства и недостатки и при выборе требует тщательного анализа. Фирма Texas Instruments выпускает специальную микросхему для получения искусственной нулевой точки. Многие фирмы выпускают ОУ, предназначенные для работы только с однополярным питанием, которые обеспечивают полный размах входа и выхода.

1.6 Устройства на операционных усилителях

1.6.1 Компаратор

Компаратор это устройство сравнения двух величин. Аналоговый компаратор сравнивает две аналоговые величины. ОУ фактически представляет собой компаратор, так как его выход зависит от разности входов. Однако применение ОУ в качестве компаратора ограничено тем, что имея огромный коэффициент усиления, ОУ усиливает самую маленькую разность напряжений на входе до напряжений источника питания. При равенстве напряжений на входах ОУ неизбежны их флуктуации (из-за пульсаций напряжений источников питания, из-за изменения напряжений источников сигнала, по другим причинам). Поэтому выходной сигнал будет хаотично изменяться в пределах от минимального до максимального (явление называется «дребезг контактов»). Чтобы избавиться от дребезга контактов, вводят явление, которое поясняется рис. и носит название «гистерезис».

Для простоты напряжение на одном из входов ($U_{вх2}$) принято постоянным ($U_{вх2} = U_1$). Напряжение на другом входе $U_{вх1}$ изменяется. Когда напряжение на первом входе достигает значения U_1 (точка 1 на рис.), выходное напряжение $U_{вых}$ изменяется до отрицательного напряжения источника питания. Явление гистерезиса состоит в том, что при понижении напряжения $U_{вх1}$, обратный переход $U_{вых}$ к положительному значению произойдет не в точке 2, а в точке 3 при напряжении $U_2 < U_1$. Дребезг устраняется, так как любое изменение напряжения $U_{вх1}$ в пределах от точки 2 до точки 3 не вызовет срабатывания ОУ. Явление гистерезиса обычно изображают в системе координат ($U, U_{вых}$). Стрелки показывают, при каком напряжении происходит срабатывание «вперед», при каком -- «назад». $U_1 - U_2$ показывает величину гистерезиса.

Для создания искусственного гистерезиса существует много приемов. Одним из них является введение положительной обратной связи (ПОС) в инвертирующий усилитель (см. рис.).

На прямом (неинвертирующем) входе напряжение всегда равно U_1 . Если входное напряжение меньше этого значения (см. слева от точки 1 на рис.10), $U_{вых} > 0$, напряжение на неинвертирующем входе равно $U_1 + U_{вых} > 0$. Если напряжение $U_{вх}$ повысится и выполнится условие $U_{вх} > U_1 + U_{вых}$ (справа от точки 1), $U_{вых} < 0$ и на прямом входе напряжение станет $U_1 + U_{вых} < U_1$. При этом сохранится состояние $U_{вых} < 0$, так как напряжение $U_{вх} > U_1 + U_{вых}$ (оно же стало выше U_1). Такое состояние сохранится до тех пор, пока выполняется условие $U_{вх} > U_1 + U_{вых}$.

При понижении напряжения $U_{вх}$ (справа от точки 2) состояние $U_{вых} < 0$ будет

продолжаться до момента, когда станет $U_{вх} -$ (справа от точки 3). Тогда установится $U_{вых} > 0$ и на прямом входе напряжение станет $+$. При этом $U_{вх}$ и на выходе сохранится состояние $U_{вых} > 0$ (следует учесть, что диаграмма не полностью соответствует описываемому случаю: на ней U_2 не изменяется).

За счет ПОС состояние ОУ сохраняется от нижнего до верхнего порога. От значения входного напряжения - до $+$ компаратор не реагирует на входной сигнал и при напряжении $U_{вх}$ выше верхнего порога его состояние $U_{вых} = 1$ (напряжение источника питания), а при $U_{вх}$ ниже нижнего порога его состояние $U_{вых} = - 1$. Здесь рассмотрен компаратор (который называется триггер Шмтта) для сравнения входного сигнала с нулем, т.е. уровни срабатывания устанавливаются вокруг нулевой точки. Если на прямой вход подать напряжение смещения $U_{см}$, то уровни срабатывания установятся относительно напряжения смещения.

Компараторы выпускаются в виде самостоятельных приборов. Наиболее известный российский компаратор 521СА3. Некоторые компараторы имеют стробирующий вход. Сравнение происходит по разрешению стробирующего входа. Выходы многих компараторов имеют возможность подключения к ним цифровых микросхем.

Имеется большое количество компараторов с однополярным питанием. В зависимости от соотношения входных сигналов выходной сигнал равен «1» или «0».

Компараторы можно использовать в следующих устройствах.

Устройства обнаружения перехода напряжения через ноль (нуль-орган).

Преобразования синусоидального напряжения в прямоугольные импульсы.

Генератор прямоугольных импульсов--мультивибратор.

Генератор прямоугольных импульсов с регулируемой скважностью.

Широтно-импульсный модулятор и много других.

Аналоговый таймер 1006ВИ1 (NE555), включающий в свой состав компараторы, позволяет создать более пятисот схем управления, включающие генераторы различных последовательностей импульсов, ШИМ-регулирование, таймеры, ждущий мультивибратор и т.д. Имеется аналог NE555, выполненный на МОП-транзисторах (ICM7555), имеющий лучшие точностные характеристики, но меньшую выходную мощность.

1.6.2 Измерительные усилители

Во многих устройствах необходимо измерять напряжение между точками, каждая из которых имеет потенциал, отличный от потенциала общей точки схемы (например, корпуса).

В этих случаях используются дифференциальные усилители, которые подавляют синфазное напряжение и усиливают дифференциальное напряжение. В качестве примера показана схема подключения измерительного усилителя к мостовой схеме, сопротивления которой $R_1 \dots R_4$ могут содержать, например, тензорезисторы. В результате их изменения меняется напряжение в измерительной диагонали Рисунок 11 моста. Недостатком такого подключения измерительного усилителя может быть его малое входное сопротивление. Для увеличения входного сопротивления усилителя необходимо использовать резисторы с большими номиналами

сопротивлений. Но это приводит к уменьшению дифференциального коэффициента усиления. Для выполнения обоих условий используют различные схемные решения, в частности, Т-образное включение сопротивления в цепи ОС (на схеме не показано) или использование дополнительного усилителя для повышения коэффициента усиления.

Обычно все дополнительные элементы, включаемые в усилитель, входят в состав микросхемы, которую называют «измерительный усилитель» или «инструментальный усилитель». Фирмы выпускают измерительные усилители в виде микросхем, обладающих теми или иными качествами. Ниже показаны примеры применения измерительных усилителей при фотометрических измерениях и при измерениях температуры.

В качестве приемника в фотометрических преобразователях обычно используют фотодиод в обратном включении. Обратное включение фотодиода характеризуется линейностью световой характеристики, но малым током. В цифровых схемах можно включить фотодиод непосредственно на вход логического элемента. Но это редко удается в связи с достаточно большими входными токами логических элементов.

Поэтому ток фотодиода усиливают с помощью Рисунок 12 ОУ.

1.6.3 Измерение температуры с помощью термопары

Одна из термопар Т1 располагается в зоне измерения, вторая Т2--в обычных условиях (например, при нуле градусов Цельсия). На измерительный прибор поступает разность напряжений термопар, которая если $T_2 = 0$, соответствует температуре Т1 в зоне

Рисунок 13 измерения. На практике такое измерение произвести сложно, так как необходимо поддерживать постоянной температуру Т2 холодного спая (операция называется термостатированием). Длительный процесс совершенствования измерений с помощью термопар привел к тому, что вместо термопары Т2 стали применять устройство, называемое компенсатором, которое создает ЭДС, равное термоЭДС термопары при нуле градусов, независимо от температуры окружающей среды. Часто компенсатор совмещают с измерительным усилителем. На схеме показана штриховой линией плата, на которой расположен полупроводниковый датчик ДТ температуры и производятся соединения рабочей термопары с медными Рисунок 14 проводами. Эти соединения сами образуют термопары, которые соответствуют термопаре холодного спая. Датчик ДТ измеряет температуру плиты, т.е. температуру холодного спая. Напряжение датчика с помощью делителя R1, R2 включается в цепь термопары и служит компенсационным напряжением. Элементы схемы подобраны так, что компенсируется то: а) что в холодном спае установлена термопара с характеристикой, отличной от характеристики Т1; б) что температура этого спая не равна нулю; подаваемое напряжение сводит температуру холодного спая к нулю. Разрыв цепи между термопарами подается на дифференциальные входы измерительного усилителя (один конец -через R2 и R5, второй через R4. Напряжение на выходе соответствует разности температур $(T_1 - 0)$ 0.

Существует много других схем измерения напряжений с помощью компенсатора.

1.6.4 Выход с общим коллектором. Нуль-орган

Компаратор с выходом типа «открытый коллектор».

Выходной сигнал ОУ может принимать значения, по величине от нуля до напряжения источников (положительного и отрицательного) питания. В компараторах же для выявления ситуации «больше-меньше» достаточно двух уровней сигнала: ноль и напряжение близкое к напряжению питания.

Это дает возможность выполнить выходной каскад компаратора с помощью одного транзистора, эмиттер которого подключен к нулю (корпусу), а коллектор с помощью резистора - к положительному полюсу источника питания. Выходные каскады некоторых компараторов (например, 521СА3) выполнены с «открытым коллектором». Термин--открытый коллектор означает, что коллектор транзистора выведен наружу, за пределы микросхемы, и подключение к внешнему источнику питания выполняется снаружи через сопротивление. В качестве сопротивления может служить резистор или, например, катушка реле (тока Рисунок 15 коллектора должно быть достаточно для срабатывания реле). Выход с открытым коллектором позволяет получить выходной сигнал с напряжением, отличающимся от напряжения питания компаратора. Такая возможность используется для связи с логическими элементами, имеющими уровень питания (5, 9, 12, 15)В и другими напряжениями. Ниже показано построение с помощью компаратора с открытым коллектором нуля--органа--устройства, фиксирующего переход напряжения (например, синусоидального) через нулевую точку.

Сопротивление R_k связывает источник питания с открытым коллектором выходного транзистора компаратора. Сопротивления R_4 -- R_5 представляют собой делитель для создания опорного напряжения напряжения на неинвертирующем входе. Если $(R_1 + R_2) = R_5$, $R_3=R_4$, входы компаратора Рисунок 16 симметричны и условие равенства напряжений на входах будет удовлетворено при $U_{вх} = 0$, так как второй вход присоединен к корпусу. Резистор R_6 положительной ОС создает гистерезис при переключениях. При $R_6= 2000R_5$ гистерезис равен приблизительно 0,1В. Диод VD не позволяет снизиться напряжению на инвертирующем входе ниже -0,1В при отрицательной полуволне входного напряжения. В этом случае диод будет открыт и напряжение в точке соединения резисторов будет равно падению напряжения на открытом диоде (-0,3В...-0,7В).

Нуль-орган позволяет преобразовать синусоидальное напряжение в последовательность прямоугольных импульсов.

Вопросы для самопроверки

- 1 Какие характеристики идеального ОУ вы можете привести.
- 2 Что значит дифференциальный входной сигнал? А синфазный?
- 3 В чем состоит преимущество применения дифференциального усилительного каскада?
- 4 Чему равен коэффициент усиления усилителя, охваченного ОС?
- 5 Какие две предпосылки обеспечивают упрощенный анализ ОУ?
- 6 В каких случаях используется искусственная нулевая точка?
- 7 Каким является выходной сигнал компаратора?

8 Можно ли с помощью компаратора связать аналоговое устройство с цифровым?

2. Схемотехника числовых (цифровых) устройств

Со времени изобретения первых цифровых интегральных схем (США, 1959) как сами ИС, так и технология их производства претерпели сильные изменения.

Характеристикой сложности ИС является параметр - степень интеграции, оцениваемый количеством базовых логических элементов, размещенных на кристалле. В соответствии с уровнем интеграции производят микросхемы МИС, СИС, БИС и СБИС (малой, средней, большой и сверхбольшой степенями интеграции). Использование находят все, однако удельный вес СБИС возрастает. Чем проще базовый элемент, тем больше его универсальность. Например, на основе элементов И-НЕ можно разработать любое устройство. Но оно будет обладать большими размерами и иметь низкое быстродействие и низкую надежность. Разработка сложного устройства на одном кристалле приведет к значительному улучшению указанных качеств. Однако такой подход приведет к удорожанию разработки, увеличению сроков разработки, удорожанию ИС и многократному увеличению номенклатуры изделий. Применение СБИС и БИС в ЭВМ позволило существенно уменьшить номенклатуру сложных ИС. Микропроцессоры используют типовые блоки, в которых производятся операции. В микропроцессорах сложности схемотехники переместились в область программирования, когда задачи решаются с помощью программ, изменение которых не требует изменения в производстве. Второй возможностью не увеличивать номенклатуру ИС является создание ПЛМ (программируемых логических матриц), в которых содержится множество логических блоков, связи между которыми устанавливает (программирует) сам схемотехник. Более того, имеется возможность совмещать на одном кристалле микропроцессор и ПЛМ, что еще более увеличивает возможности интеграции. Несмотря на бесспорные достижения в области создания сложных ИС, применение разработанных ранее и применявшихся долгое время серий ИС продолжается и будет продолжаться. Это связано с тем, что многие устройства экономически и аппаратно выгодно выполнять на этих элементах. Более того, в самых сложных системах есть узлы, которые целесообразно выполнить на этих элементах. Поэтому в курсе схемотехника в пределах заданного количества часов последовательно будут рассмотрены элементы в порядке их усложнения. Предполагается, что предварительно изучен курс «Промышленная электроника» и получены основные сведения «Алгебры логики».

2.1 Элементная база схемотехники

2.1.1 Серии элементов.

В настоящее время наиболее широкое применение находят ИС, изготавливаемые по ТТЛ и КМОП-технологиям (КМДП). Каждая технология непрерывно развивается и совершенствуется с целью увеличения быстродействия и уменьшения потребляемой мощности.

Серии ТТЛ ИС выпускаются, как правило, в четырнадцати или шестнадцативыводных корпусах, с напряжением питания V . Напряжение питания подается на выводы по диагонали корпуса: 0В--на седьмой или восьмой вывод, 5В -на

четырнадцатый или шестнадцатый вывод. Номера выводов отсчитываются по часовой стрелке, начиная от ключа, если смотреть сверху (со стороны маркировки и ключа). В одном корпусе размещается несколько элементов, подключенных к выводам источника питания. Как правило, входы и выходы одного элемента располагаются рядом.

Серии различаются, в основном, по быстродействию (определяется временем задержки распространения $t_{з.р}$), по потребляемой мощности, по входному и выходному токам. Так как в единичном состоянии элемента и нулевом состоянии токи сильно отличаются, в большинстве справочников указываются и те и другие (например, $I_{0вых}$ или $I_{1вх}$).

Таблица 1 Распространенные серии элементов ТТЛ и их основные характеристики

Обозначен. серий

$t_{з.р}$
(нс)

$I_{0вых}$
(мА)

$I_{1вх}$
(мА)

P
(мВт)

Международ.

Устаревш.

SN74

K155

10

16

-0,4

10

SN74S

K531

3

20

-1

20

SN74LS

K555

10

8

- 0,4

2

SN74ALS

KP1533

4

8

- 0,4

2

SN74L

K134

33

0,5

- 0,15

1

В таблице указаны средние значения величин.

Выпускаются и другие серии, характеристики которых можно найти в справочниках. Все серии совместимы по входам и выходам. При использовании различных серий следует учитывать различные выходные токи, т.е. взаимную нагрузочную способность. Все серии кроме элементов со стандартным выходом содержат элементы с повышенной нагрузочной способностью (буферы), выходной ток которых приблизительно в три раза выше стандартного.

В различных сериях имеются микросхемы одинакового функционального назначения, имеющие одинаковую структурную схему, условное обозначение и цоколевку (расположение выводов). Некоторые микросхемы встречаются только в определенных сериях. В состав серий входят такие элементы, как формирователи, генераторы, логические элементы, триггеры, счетчики, ключи, мультиплексоры, регистры, дешифраторы и др. Состав и эксплуатационные характеристики отдельных микросхем находят в справочниках.

2.1.2 Основные характеристики элементов

Основными элементами микросхем на основе КМДП-технологии являются комплементарные полевые транзисторы с индуцированным каналом. Эти ИС

характеризуются малым потреблением мощности в статическом режиме, большой помехозащищенностью по сравнению с ТТЛ. У КМДП ИС быстродействие существенно зависит от напряжения питания.

Отклонения выходных напряжений логического нуля $U_{0вых}$ и логической единицы $U_{1вых}$ от уровней напряжений источника питания очень небольшие и достигают 10мВ при температуре 250С и 50мВ при температуре 1250С. Это является фактором, повышающим помехоустойчивость ИС. В то же время уровни $U_{0вых}$ и $U_{1вых}$ существенно зависят от токов нагрузки. Это необходимо учитывать при совместном использовании ИС КМДП и ТТЛ, а так же транзисторов. В разных типах КМДП ИС токи $I_{0вых}$ и токи $I_{1вых}$ могут отличаться в десятки раз из-за особенностей выходного каскада. При понижении температуры эти токи увеличиваются из-за уменьшения сопротивления канала.

Нагрузочная способность КМДП ИС очень высока, так как токи ИС очень малы (до 1000 вводов на один вывод).

Таблица 2 Распространенные серии элементов КМДП и их основные характеристики

Обозначен. серий

tz.p
(нс)

$I_{0вых}$
(мА)

$I_{1вых}$
(мА)

Uпит,
(В)

Международ.

Устаревш.

CD4000

176

200

-

-

9, 3...15

CD4000A

564, 561

80

0,25...0,45

0,25...0,55

3...15

CD4000B

KP1561

25

1,1

-0,44

3...18

54HC

1564

4

8

- 0,4

2...6

74НС

1564

10

5

5

5

В таблице указаны средние значения величин.

В настоящее время серия CD4000 не выпускается за исключением некоторых микросхем. Наиболее употребительными являются серии CD4000А и CD4000В.

По сравнению с ТТЛ ИС КМОП имеют следующие достоинства:

малая потребляемая мощность при частотах до 1МГц;

большой диапазон напряжений питания (3...15)В, можно использовать нестабилизированный источник питания;

высокое входное сопротивление;

большой коэффициент разветвления (до 1000);

незначительная зависимость характеристик от температуры.

Недостатки наиболее употребляемых серий (561 и 1561):

высокое выходное сопротивление (до 1кОм);

влияние емкости нагрузки и напряжения питания на характеристики ИМС;

разброс параметров, большие времена задержек.

Постоянное совершенствование технологического процесса постепенно устраняет эти недостатки.

2.1.3 Типы выходов цифровых микросхем

Физические параметры и функциональные возможности ИМС зависят от выполнения выходного каскада: стандартный выходной каскад; выходной каскад с тремя состояниями выхода; выходной каскад с открытым коллектором; выходной каскад с открытым эмиттером. В некоторые ИМС (кроме стандартного выхода) встроены мощные транзисторы, эмиттер, коллектор и база которых выведены наружу и могут подключаться как к внешним выводам ИМС, так и к другим устройствам.

Стандартный выходной каскад ТТЛ показан на рис. (на схеме не показаны элементы, служащие для увеличения быстродействия, например, диоды Шоттки, или помехозащищенности). На базы транзисторов $VT1$ и $VT2$ подаются напряжения в противофазе. Когда транзистор $VT1$ закрыт, $VT2$ открыт (и наоборот). В соответствии с этим $U_{вых}$ равно нулю или единице. Такой выходной каскад обеспечивает высокую крутизну фронта и среза. Выходной ток нулевого состояния $I_{0вых}$ (когда открыт транзистор $VT2$) значительно превосходит ток $I_{1вых}$ единичного состояния (открыт транзистор $VT1$). Это обусловлено наличием резистора R и диода VD . Диод сдвигает уровень базы транзистора $VT1$, что необходимо для уничтожения состояний при переключении транзисторов. Сопротивление R ограничивает ток транзистора при замыкании вывода на корпус, микросхема не выходит из строя.

Выходные каскады различных серий могут несколько отличаться друг от друга.

Стандартный выходной каскад КМОП показан на рис. Он проще, так как комплементарные транзисторы работают в противофазе при одном и том же входном сигнале. Выходной ток единичного состояния мало отличается от тока нулевого состояния. В момент переключения транзисторов так же, как и в ТТЛ, возникает сквозной ток через оба транзистора, и возникают импульсные помехи, с которыми приходится бороться.

Выход с тремя состояниями для ИМС ТТЛ показан на рис.

Микросхема имеет управляющий вход OE . При $OE = 0$ микросхема работает так же, как микросхема со стандартным выходом. При $OE = 1$ напряжения на базах транзисторов U_a и U_b принимают нижний (запирающий) уровень. Транзисторы запираются, выходные токи отсутствуют, выходное сопротивление становится равным сотням $k\Omega$. Это высокоимпедансное состояние выхода называют третьим состоянием или Z -состоянием. Такой выход, присоединенный к выходу другой микросхемы, никак не повлияет на выходной сигнал.

Выходы логических элементов с тремя состояниями могут соединяться параллельно, реализуя при этом логическую функцию ИЛИ. Так как она создается только за счет монтажа, функция называется «монтажное ИЛИ». Логические элементы с тремя состояниями выходов имеют обычно повышенную нагрузочную способность и называются драйверами. Драйверы широко применяются в микропроцессорных

системах для подключения устройств к системным шинам.

Выходной каскад с открытым коллектором (стоком) представляет собой транзистор, коллектор которого выведен наружу. Вывод такого транзистора подключается к источнику питания либо через нагрузку, потребляющую ток, равный току транзистора (например, обмотку реле), либо через дополнительный резистор.

Транзистор VT может выдать ток, существенно больший стандартного тока.

Транзисторы рассчитаны на напряжения 5, 15, 30, 35В и др. Открытые коллекторы нескольких микросхем могут присоединяться к одному источнику питания через общий резистор. Такое соединение реализует «монтажное ИЛИ» для нулевых выходных уровней или «монтажное И» для единичных уровней.

Возможности подключения открытого коллектора к различным источникам питания позволяют повысить напряжение логической единицы выше 5В. Это используется для согласования элементов, питающихся разными напряжениями.

Наряду с выходными каскадами с открытым коллектором выпускаются ИМС с открытым эмиттером, которые также имеют свои особенности.

На рис. слева направо показаны значки, которые устанавливаются на выходах логических элементов в схемах: выход с Z-состоянием; выход с открытым коллектором (стоком); выход с открытым эмиттером (исток). Некоторые ИМС могут содержать элементы, сочетающие разные типы выхода.

2.1.4 Входные цепи ИС

Входные цепи ИМС не должны оставаться отсоединенными от источника сигнала, когда сигнал на них не должен поступать. Такие ситуации могут возникнуть, например, когда вход ИМС подключен к механическому переключателю или к Z-выходу предыдущей микросхемы. На отключенных входах могут индуцироваться потенциалы, величина которых сопоставима с величиной полезного сигнала или даже может превосходить их. Это может вызвать ложное срабатывание. Если наведенный потенциал имеет некоторое граничное значение, соответствующее фронту или срезу, могут возникнуть сквозные токи, имеющие опасные последствия. Избежать таких ситуаций можно, привязав входы микросхем к напряжению источника питания или к нулю с помощью сопротивлений больших номиналов (сотни кОм для КМОП-микросхем). На левом рис., при третьем состоянии выхода ИМС DD1 вход DD2 должен находиться, например, при высоком потенциале, на правом-- при низком. Эти напряжения обеспечиваются резисторами R. Такие резисторы соответственно называются подтягивающими (подтягивает к напряжению питания) и заземляющими.

Напряжения, поступающие с их помощью на вход ИМС называются слабыми.

Сигналы, поступающие от предыдущего источника, многократно превышают слабые сигналы. Действие слабых сигналов при наличии сильных бесконечно мало и не ощущается. При отсутствии сильных сигналов слабые создают на входах необходимые потенциалы.

Защита от перенапряжений на входах ИМС показана на рис. При положительном входном сигнале, большем напряжения питания, диод VD1 откроется. Напряжение на затворе будет ограничено величиной напряжения питания плюс падение

напряжения на диоде. При отрицательном напряжении на входе откроется диод VD2, и напряжение на затворе будет по величине не более напряжения на диоде (в обоих случаях предполагается, что наведенный сигнал невелик по мощности и проводящий диод снизит его напряжение).