**ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЕ**

**ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ**

Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) предназначен для преобразования числа, определенного, как правило, в виде двоичного кода в напряжение или ток, пропорциональные значению цифрового кода [1,2,5,9,10,11]. Он применяется в системах передачи данных, в измерительных приборах и синтезаторах напряжения, при формировании изо­бра­жения на экране дисплеев, в качестве узлов обратной связи в аналого-цифровых преобразователях.

Схемы ЦАП можно классифицировать по различным признакам: принципу действия, виду выходного сигнала, полярности выходного сигнала, элементной базе и т.д. На рис.13.1 представлена классификационная схема ЦАП по схемотехническим признакам. По принципу действия наибольшее распространение получили ЦАП со сложением токов, с делением напряжения и со сложением напряжений. В микроэлектронном исполнении применяют только первые два типа.

 

 Рис.13.1. Классификация ЦАП

По виду выходного сигнала АП делят на два вида: с токовым выходом и выходом по напряжению. Для преобразования выходного тока в напряжение обычно используют операционные усилители. По полярности выходного сигнала ЦАП принято делить на однополярные и двухполярные.

Управляющий код на входе ЦАП может быть различным: двоичным, двоично-десятичным, Грея, унитарным и др. Различными могут быть и уровни логических сигналов на входе ЦАП.

При формировании выходного напряжения ЦАП под действием управляющего кода обычно используют источники опорного напряжения. В зависимости от вида этого источника ЦАП делят на две группы: с постоянным опорным напряжением и с изменяющимся опорным напряжением. Кроме этого, ЦАП делят по основным характеристикам: количеству разрядов преобразуемого кода, быстродействию, точности преобразования, потребляемой мощности. По совокупности параметров ЦАП делят на три группы: общего применения, прецизионные (погрешность нелинейности менее 0,1%) и быстродействующие (время установления менее 100 нс).

**ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЕ ЦАП**

**ЦАП с широтно-импульсной модуляцией.** Очень часто ЦАП входит в состав микропроцессорных систем. В этом случае, если не требует­ся высокое быстродействие, цифро-аналоговое преобразование может быть очень просто осуществлено с помощью широтно-импульсной мо­­­дуляции (ШИМ). Схема ЦАП с ШИМ приведена на рис.13.2,а.



 Рис.13.2. ЦАП с широтно-импульсной модуляцией

Наиболее просто организуется цифро-ана­логовое преобразо­ва­ние в том случае, если микроконтроллер имеет встроенную функцию широтно-импульсного преобразования (напр­и­мер, AT90S8515 фирмы Atmel или 87С51GB фирмы Intel). Выход ШИМ управляет ключом *S*. В зависимости от заданной разрядности преобразования (для контроллера AT90S8515 возможны режимы 8, 9 и 10 бит) контроллер с помощью своего тай­мера /счетчика формирует последовательность импульсов, относительная длительность которых g=*t*и/*Т* определяется соотно­ше­нием

 ,

где *n* - разрядность преобразования, а *N* - преобразуемый код. Фильтр нижних частот сглаживает импульсы, выделяя среднее значение напряжения. В результате выходное напряжение преобразователя

 .

Рассмотренная схема обеспечивает почти идеальную линейность преобразования, не содержит прецизионных элементов (за исключением источника опорного напряжения). Основной ее недостаток - низкое быстродействие.

**Последовательный ЦАП на переключаемых конденсаторах.**

Рас­­­­смотренная выше схема ЦАП с ШИМ вначале преобразует цифровой код во временной интервал, который формируется с помощью двоичного счетчика квант за квантом, поэтому для получения *n*-разрядного преобразования необходимы 2*n* временных квантов (тактов). Схема последовательного ЦАП, приведенная на рис.13.3, позволяет выполнить цифро-аналоговое преобразование за значительно меньшее число тактов.



 Рис.13.3. Схема последовательного ЦАП на

 переключаемых конденсаторах

В этой схеме емкости конденсаторов *С*1 и *С*2 равны. Перед началом цикла преобразования конденсатор *С*2 разряжается ключом *S*4. Входное двоичное слово задается в виде последовательного кода. Его преобразование осуществляется последовательно, начиная с младшего разряда *а*0. Каждый такт преобразования состоит из двух полутактов. В первом полутакте конденсатор *С*1 заряжается до опорного напряжения *Uоп* при *а*0=1 посредством замыкания ключа *S*1 или разряжается до нуля при *а*0=0 путем замыкания ключа *S*2. Во втором полутакте при разомкнутых ключах *S*1, *S*2 и *S*4 замыкается ключ *S*3, что вызывает деление заряда пополам между *С*1 и *С*2. В результате получаем *U*1(0)=*Uвых*(0)=(*а*0/2)*Uоп*.

Пока на конденсаторе *С*2 сохраняется заряд, процедура заряда конденсатора *С*1 должна быть повторена для следующего разряда *а*1 входного слова. После нового цикла перезарядки напряжение на конденсаторах будет

 .

Точно также выполняется преобразование для остальных разрядов слова. В результате для *n*-разрядного ЦАП выходное напряжение будет равно

 .

Если требуется сохранять результат преобразования сколь-нибудь продолжительное время, к выходу схемы следует подключить устройство выборки и хранения УВХ. После окончания цикла преобразования следует провести цикл выборки, перевести УВХ в режим хранения и вновь начать преобразование.

Таким образом, представленная схема выполняет преобразование входного кода за 2*n* квантов, что значительно мень­ше, чем у ЦАП с ШИМ. Здесь требуется только два согласованных конденсатора небольшой емкости. Конфигурация аналоговой части схемы не зависит от разрядности преобразуемого кода. Однако по быстродействию последовательный ЦАП значительно уступает параллельным цифро-аналоговым преобразователям, что ограничивает область его применения.

**ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ЦАП**

**ЦАП с суммированием весовых токов.** Большинство схем па­рал­лельных ЦАП основано на суммировании токов, сила каждого из которых пропорциональна весу цифрового двоичного разряда, при­чем должны суммироваться только токи разрядов, значения цифры в которых равны 1. Пусть, например, требуется преобразовать двоич­ный четы­рехразрядный код в аналоговый сигнал тока. У четвертого, старшего значащего разряда (СЗР) вес будет равен 23=8, у третьего разряда - 22=4, у второго - 21=2 и у младшего (МЗР) - 20=1. Если вес МЗР IМЗР=1 мА, то IСЗР=8 мА, а максимальный выходной ток преоб­разователя Iвых.макс=15 мА и соответствует коду 11112. Понятно, что коду 10012, например, будет соответствовать Iвых=9 мА и т.д. Следо­вательно, тре­буется построить схему, обеспечивающую генерацию и коммутацию по заданным законам точных весовых токов. Простей­шая схема, реа­лизующая указанный принцип, приведена на рис.13.4.

 .

 Рис.13.4. Простейшая схема ЦАП с суммированием

 весовых токов

Сопротивления резисторов выбирают так, чтобы при замкнутых ключах через них протекал ток, соответствующий весу разряда. Ключ должен быть замкнут тогда, когда соответствующий ему бит входного слова равен единице. Выходной ток определяется соотношением

 .

При высокой разрядности ЦАП токозадающие резисторы должны быть согласованы с высокой точностью. Наиболее жесткие требо­ва­ния по точности предъявляются к резисторам старших разрядов, поскольку разброс токов в них не должен превышать тока младшего разряда. Поэтому разброс сопротивления в *i*-м разряде должен быть меньше, чем

 ΔR / R=2-*i*.

Из этого условия следует, что разброс сопротивления резистора, например, в четвертом разряде не должен превышать 3%, а в 10-м разряде - 0,05% и т.д.

Суммирование весовых токов наиболее целесообразно выполнить с помощью операционного усилителя по рис.13.5. Здесь представлена ба­зо­вая структурная схема 4-разрядного ЦАП (так называемая схема на взвешенных резисторах). Четыре би­та, фиксируемые в регистре, управляют состоянием четы­рёх ключей и обеспечивают 16 различных комбинаций. ОУ включён по схеме сумма­­­­­­­­­­тора. При замыкании одного из ключей выходное напряжение ЦАП определя­ется произведением опор­но­го напряжения *Uоп* на от­но­ше­ние сопротивлений резис­тора об­ратной связи ОУ к резистору матри­цы, находя­ще­му­ся в цепи данного ключа.



 Рис.13.5*.* Базовая структурная

 схема четырёхразрядного ЦАП

 Если, например, замкнут ключ, соответствующий старшему зна­чащему разряду СЗР регис­тра (при установке в триггере этого разряда логической 1), то выходное напряже­ние *Uвых= – (R/2R)Uоп* *= –Uоп / 2*. При ус­­тановке уровня сигнала 1 в разряде 1 по­лу­чим *Uвых =* *–(R/8R) Uоп= –Uоп/8*. Замыкание каждого следующего ключа (в направле­нии уве­ли­че­ния веса разрядов) вы­зывает прирост выходного напря­же­ния, вдвое превышаю­щий результат замыкания пре­дыдущего клю­ча. При замы­ка­нии нескольких ключей резуль­тирующее выход­ное напряжение опреде­ляется суммой вкладов от каж­дого замкнутого клю­ча. Например, при ус­­тановке логической 1 в разрядах 3 и 1 полу­ча­ем выходное нап­ря­жение *Uвых= –(Uоп / 2 + Uоп / 8)*. Таким обра­зом, можно получить 16 раз­личных дискретных уров­ней выходного нап­ряжения, соответствующих 16 различным двоич­ным комбинациям на входе ЦАП. Соотношения сопротивлений ре­зис­­торов должны быть вы­держаны с высокой точ­ностью для обеспе­чения необходимой ли­нейности преобразования вход­ного кода в вы­ходное напряжение.

Конструирование такого ЦАП на одном кристалле вызывает определённые трудности. Это объясняется слишком большим диапа­зо­ном величин сопротивлений вхо­дящих в него резисторов. В рас­смат­риваемом 4-разрядном ЦАП сопротивление резистора в цепи младшего значащего разряда МЗР должно быть в 16 раз больше сопротивления ре­зис­тора обратной связи. В об­щем случае для *n*–разрядного преобразователя нужны *n*+1 резистор, а сопро­тив­ление ре­зис­тора в цепи МЗР должно быть в 2*n* раз больше соп­ро­тивления резистора обратной связи. Реальное значение *R*, которое можно получить для резистора в рамках интегральной микросхемы, составляет 5-10 КОм. А в 8-разрядном ЦАП требуется 9 резисторов с сопротивлением от 5 КОм до 1.28 МОм (256 × 5 кОм), в то время как в 12-разрядном – 13 резисторов с нереальным диапазоном сопро­тивлений вплоть до 20.48 МОм.

Рассмотренная схема при всей ее простоте обладает целым букетом недостатков. Во-первых, при различных входных кодах ток, потребляемый от источника опорного напряжения (ИОН), будет различным, а это повлияет на величину выходного напряжения ИОН. Во-вторых, значения сопротивлений весовых резисторов могут различаться в тысячи раз, а это делает весьма затруднительной реализацию этих резисторов в полупроводниковых ИМС с необходимым классом точности. Кроме того, сопротивление резисторов старших разрядов в многоразрядных ЦАП могут быть соизмеримы с сопротивлением замкнутого ключа, а это приведет к погрешности преобразования. В-третьих, в этой схеме к разомкнутым ключам прикладывается значительное напряжение, что усложняет их построение.

Эти недостатки устранены в схеме ЦАП AD7520 (отечественный аналог 572ПА1), разработанном фирмой Analog Devices в 1973 г., которая в настоящее время является по существу промышленным стан­дартом (по ней выполнены многие серийные модели ЦАП). Указанная схема представлена на рис.13.6. В качестве ключей здесь исполь­-



Рис.13.6. Схема ЦАП с переклю­ча­телями и матрицей *R*-2*R* посто­-­

 ян­ного импеданса

­зу­ют­ся МОП-тран­зисто­ры.

В этой схеме задание весовых коэффициентов ступеней преоб­разователя осуществляют посредством последовательного деления опорного напряжения с помощью резистивной матрицы *R*-2*R* посто­ян­ного импеданса. Основной элемент такой матрицы представляет собой делитель напряжения (рис.13.7), который должен удов­лет­во­рять сле­дую­щему условию: если он нагружен на сопротивление *Rн*, то его входное сопротивление *Rвх* также должно принимать значение *Rн*. Коэффициент ослабления цепи *a*=*U2*/*U1* при этой нагрузке должен иметь заданное значение. При выполнении этих условий получаем следующие выражения для сопротивлений:



Рис.13.7. Построение ступени матрицы по­-

 стоянного импеданса

  .

При двоичном кодировании *a* =0,5. Если положить *Rн*=2*R*, то *Rs*=*R* и *Rp*=2*R* в соответствии с рис.13.6.

Поскольку в любом положении переключателей *Si* они соединяют нижние выводы резисторов с общей шиной схемы, источник опорного напряжения нагружен на постоянное входное сопротивление *Rвх*=*R*. Это гарантирует неизменность опорного напряжения при любом входном коде ЦАП.

Согласно рис.13.6, выходные токи схемы определяются соотношениями

  ;  ,

а входной ток

  .

Поскольку нижние выводы резисторов 2*R* матрицы при любом состоянии переключателей *Si*соединены с общей шиной схемы через низкое сопротивление замкнутых ключей, напряжения на ключах всегда небольшие, в пределах нескольких милливольт. Это упрощает построение ключей и схем управления ими и позволяет использовать опорное напряжение из широкого диапазона, в том числе и различной полярности. Поскольку выходной ток ЦАП зависит от *Uоп* линейно, преобразователи такого типа можно использовать для умножения аналогового сигнала (подавая его на вход опорного напряжения) на цифровой код. Такие ЦАП называют перемножающими (MDAC).

На рис.13.8 показана схема ЦАП на резистивной матрице R-2R cо сложением весовых значений токов операционным усилителем.

 Рис.13.8. ЦАП на сетке *R*-2*R*

Для доказательства возможности ис­пользования такой резистор­ной матрицы в схеме ЦАП рассмотрим величины токов в параллельных ветвях к суммирующей точке ОУ.

Потенциалы средней точки переключателей *S0,…S3* вне зависи­мости от положения подвижного элемента (верхнее или нижнее) остаются одинаковыми и равными потенциалу земли, так как в нижнем положении они подключаются к клемме “земля”, а в верхнем поло­жении они подключаются к суммирующей точке операционного усили­теля ОУ, потенциал которой по условиям работы ОУ близок к потенциалу земли. Отсюда следует, что переключения *Si* не вызывают изменения картины токов в резисторной матрице *R-*2*R*.

Рассмотрим картину токов в нижнем плече матрицы – точка *a0*. К ней подключены два резистора с одинаковым номиналом 2*R*, то есть токи *I0* и *I0’* равны. Общее же сопротивление этих двух параллельно включенных резисторов *R0об = (2R\*2R)/(2R+2R) = R*.

По закону Кирхгофа ток *I1 = I0 + I0’ = 2I0’*. Сопротивление вертикального участка цепи между точкой ***а***1 и землёй равняется *R1 = R + R0об = R + R = 2R*, то есть равно сопротивлению горизонтального участка от этой же точки. Следовательно, протекающие по ним токи также равны: *I1 = I1’*. Так как *I1 =* 2*I0’*, то и  *I1’ = 2I0’*. Общее же сопротив­ление резисторов, подключенных к точке *а*1, по отношению к земле *R1об = (R1\*2R)/(R1+2R) = (2R\*2R)/(2R+2R) = R*.

Рассуждая аналогично по отношению к точкам *а*2, *а*3, придём к соотношениям: *I2’ = 2I1’ = 4I0’*, *I3’ = 2I2’ = 8I0’*. Отсюда следует, что отно­ше­ния вели­чи­н токов в соседних параллельных ветвях матрицы кратны двум; их соотношения соответствуют коэффициентам 8-4-2-1, как это имеет место в схеме, показанной на рис.13.5. Поэтому схема на рис.13.8 реализует преобразование цифры в аналог по двоичной системе счисления.

Точность этой схемы снижает то обстоятельство, что для ЦАП, имеющих высокую разрядность, необходимо согласовывать сопро­тив­ления R0 ключей на полевых транзисторах с разрядными токами. Особенно это важно для ключей старших разрядов. Например, в 10-разрядном ЦАП AD7520 ключевые МОП-транзисторы шести старших разрядов сделаны раз­ны­ми по площади и их сопротивление R0 нарастает согласно двоич­ному коду (20, 40, 80, … , 640 Ом). Таким способом уравниваются (до 10 мВ) падения напряжения на ключах первых шести разрядов, что обеспечивает монотонность и линейность переходной характе­ристики ЦАП. 12-разрядный ЦАП 572ПА2 имеет дифференциальную нелинейность до 0,025% (1 МЗР).

ЦАП на МОП ключах имеют относительно низкое быстро­дей­ствие из-за большой входной емкости МОП-ключей. Тот же 572ПА2 имеет время установления выходного тока при смене вход­ного кода от 000...0 до 111...1, равное 15 мкс. 12-разрядный DAC7611 фирмы Burr-Braun имеет время установления выходного напряжения 10 мкс. В то же время ЦАП на МОП-ключах имеют минимальную мощность потребления. Тот же DAC7611 потребляет всего 2,5 мВт. В последнее время появились модели ЦАП рассмотренного выше типа с более высоким быстродействием. Так 12-разрядный AD7943 имеет время установления тока 0,6 мкс и потребляемую мощность всего 25 мкВт. Малое собственное потребление позволяет запитывать такие микромощные ЦАП прямо от источника опорного напряжения. При этом они могут даже не иметь вывода для подключения ИОН, например, AD5321.

**ЦАП на источниках тока** обладают более высокой точностью. В от­личие от предыдущего варианта, в котором весовые токи форми­ру­ются резисторами сравнительно небольшого сопротивления и, как следствие, зависят от сопротивления ключей и нагрузки, в данном слу­­­­чае весовые токи обеспечиваются транзистор­ными источниками то­ка, имеющими высокое динамическое сопро­тив­ление. Упрощенная схема ЦАП на источни­ках тока приведена на рис.13.9.



 Рис.13.9. Схема ЦАП на

 источ­никах тока

Весовые токи фор­ми­ру­ются с помощью резистивной матрицы. Потенциалы баз тран­зисторов одинаковы, а чтобы были равны и потенциалы эмиттеров всех транзисторов, площади их эмиттеров делают различными в соответствии с весовыми коэффициентами. Правый резистор матрицы подключен не к общей шине, как на схеме рис.13.4, а к двум параллельно включенным одинаковым транзисторам *VT0* и *VTн*, в результате чего ток через *VT0*равен половине тока через *VT1*. Входное напряжение для резистивной матрицы создается с помощью опорного транзис­тора *VTоп* и операционного усилителя ОУ1, выходное напряжение которого устанавливается таким, что коллекторный ток транзистора *VTоп* принимает значение *Iоп*. Выход­ной ток для *n*-разрядного ЦАП

 .

Характерными примерами ЦАП на переключателях тока с биполярными транзисторами в качестве ключей являются 12-разрядный 594ПА1 с временем установления 3,5 мкс и погрешностью линейности не более 0,012% и 12-разрядный AD565, имеющий время установления 0,2 мкс при такой же погрешности линейности. Еще более высоким быстродействием обладает AD668, имеющий время установления 90 нс и ту же погрешность линейности. Из новых раз­работок можно отметить 14-разрядный AD9764 со временем уста­новления 35 нс и погрешностью линейности не более 0,01%. В качестве переключателей тока *Si*часто используются биполярные дифференциальные каскады, в которых транзисторы работают в активном



Рис.13.10. Переключатель тока на дифференциаль-­

ных усилителях

режиме. Это позволя­ет сократить время ус­та­­­новления до еди­ниц на­носекунд. Схема переключателя тока на диффе­рен­циа­ль­ных усилителях приведена на рис.13.10.

Дифференциальные каскады *VT1-VT3* и *VT'1-VT'3* образованы из стандартных ЭСЛ вентилей. Ток *Iк*, протекающий через вывод кол­лектора выходного эмиттерного повторителя, является выходным током ячейки. Если на цифровой вход *Di*подается напряжение высо­кого уровня, то транзистор *VT3* открывается, а транзистор *VT'3* закры­вается. Выходной ток определяется выражением

 .

Точность значительно повышается, если резистор *Rэ* заменить источником постоянного тока, как в схеме на рис.13.9. Благодаря симметрии схемы существует возможность формирования двух выходных токов – прямого и инверсного. Наиболее быстро­действующие модели подобных ЦАП имеют входные ЭСЛ-уровни. Примером может служить 12-ти разрядный МАХ555, имеющий время установления 4 нс до уровня 0,1%. Поскольку выходные сиг­налы таких ЦАП захватывают радиочастотный диапазон, они имеют выходное сопротивление 50 или 75 Ом, которое должно быть согласовано с волновым сопротивлением кабеля, подключаемого к выходу преобразователя.

**Принципы построения ЦАП для троичной системы счисле­ния.** Познавательный интерес представляет возможность выполнения цифро-аналоговых преобразований для систем счисления с любым основанием. В общем случае ЦАП находит аналоговый эквивалент заданной кодовой комбинации последовательным выполнением операций сложения произведений веса каждого разряда на соответствующую цифру в этом разряде. Отсюда основой построения ЦАП является сумматор на операционном усилителе. Для типовой схемы ЦАП на взвешенных резисторах по рис.13.5 эквивалентом веса разряда является величина тока, протекающая через тот или иной резистор на суммирующую точку операционного усилителя. Величины токов задаются значениями сопротивлений, номиналы которых уменьшаются в два раза при переходе от младшего разряда к последующему более старшему разряду. Если бит соответствующего разряда равен единице, то ключ Si подсоединяет цепь тока к суммирующей точке ОУ, в противном случае при нулевом значении бита цепь тока этого разряда разорвана.

 Этот принцип по­строения преобразо­ва­ния следует приме­нить и при разра­бот­ке ЦАП для троич­ной системы счисле­ния. Принципиаль­ная схема устройства представлена на рис.13.11.

Рис.13.11. Принципи­аль­ная схема ЦАП для троичной системы счи­-

 сления

В системе счи­сления с ос­но­ванием n используются циф­ры от нуля до (n-1), то есть в нашем слу­чае 0,1,2. Преоб­ра­зуемый код заносит­ся в ре­гистр ЦАП, и вес разряда при пере­ходе от нулевого млад­­­ше­го к после­дующему старше­му определяется последователь­ностью 30, 31, … 3n-1. В каждом i-ом разряде преобразуемого кода может находиться одна из цифр набора 0,1,2 при общем количестве разрядов n. В зависимо­сти от величины цифры младшего нулевого разряда переключатель S0 устанавливается в одно из трёх положений: нижнее (цифра 0), среднее (цифра 1) и верх­нее (циф­ра 2). Совокупность цифр разряда реализуется набором из трёх резисто­­ров – R00, R01, R02 (здесь и далее в индексах резисторов первая цифра указывает на номер реализуемого разряда, второй символ определяет моделируемую цифру набора). Нулевое значение млад­­­шей цифры моделируется тем, что выход нижнего резистора группы R00=R подсоединён к земле. Величины остальных двух резисторов группы цифр младшего разряда устанавливаются из следующих соображений. Наличие единичного сигнала на среднем резисторе R01 группы младшего разряда, моделирующего цифру 1, должно вызывать появление на выходе ОУ напряжения, эквивалентного единице. Следовательно, коэффициент передачи ОУ по этому каналу дол­жен быть равен единице, и тогда на основании выражения (5.3) R01=R. По аналогии наличие единичного сигнала на резисторе R02 группы млад­шего разряда, моделирующего цифру 2, должно вызывать появление на выходе ОУ напряжения, эквивалентного двум. Поэтому коэффициент передачи по этому каналу должен быть равен двум, и на основании (5.3) R02=R/2.

Переход к моделированию цифр первого разряда должен учитывать вес этих цифр, равный 31. Здесь и далее ситуация с резисторами R10, R20, …остаётся неизменной – они подключены к земле через резистор R. Сигнал на входе резистора R11 должен приводить к появлению на выходе ОУ напряжения, эквивалентного 31, поэтому коэффициент передачи канала должен быть равен трём, и R11=R/3. Сигнал на входе резистора R12 должен вызывать появление на выходе ОУ напряжения, эквивалентного шести. Тогда R12=R/6.

Далее всё повторяется с увеличением весов последующих разрядов в три раза и снижением сопротивлений резисторов в три и шесть раз. Получили схему ЦАП для троичной системы счисления на взвешенных резисторах (рис.13.11), которая полностью повторяет недостатки аналогичной схемы для двоичной системы счисления.