БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Кафедра систем телекоммуникаций

РЕФЕРАТ

На тему:

«Генераторы стабильного тока и напряжения»

МИНСК, 2008

**Генераторы стабильного тока**

Для смещения и стабилизации режимов ИС широко используют генераторы стабильного тока (ГСТ): для стабилизации режимов и в качестве активной нагрузки усилительных каскадов; в качестве ИП эмиттеров Т дифференциальных усилителей; в интеграторах, генераторах пилообразного напряжения и т.д. Под ГСТ понимают двухполюсник, ток через который практически не зависит от приложенного напряжения. Если на такой двухполюсник подать сумму постоянного  и переменного  напряжений, то его сопротивление  для переменной составляющей будет высоким. Сопротивление  для постоянной составляющей обычно требуется небольшое. Важнейшими параметрами ГСТ являются выходное сопротивление  (в идеале ), выходной постоянный ток  и рабочий диапазон – диапазон выходного напряжения, в котором ГСТ сохраняет свои свойства.

Простейший ГСТ (рис. 1, а) обеспечивает ток , где ,  – напряжение база – эмиттер и коэффициент передачи тока Т. Для определения параметра  напомним, что выходное сопротивление каскада с ОЭ (без учета нагрузки) составляет

, (1)



а б в г



д е ж

Рис. 1. Схемы генераторов стабильного тока

где  – эквивалентное (с учетом делителя смещения) сопротивление генератора;  – суммарное (с учетом дифференциального сопротивления ) сопротивление в цепи эмиттера.

Применительно к рассматриваемому ГСТ выражение (1) трансформируется в . При малых токах величина  составляет десятки и сотни килоом. Рабочий диапазон соответствует изменению напряжения  на коллекторе в пределах от  до . Основными недостатками этого ГСТ являются: относительно невысокое выходное сопротивление; низкая температурная и режимная (при изменении напряжения  ИП) стабильность выходного тока.

Для повышения стабильности с помощью дополнительных сопротивлений  и  вводится эмиттерная стабилизация ГСТ (см. рис.1, а), при которой ток . Она, как следует из соотношения (1), увеличивает сопротивление  ГСТ, но уменьшает его рабочий диапазон на падение напряжения . Дальнейшее повышение температурной стабильности достигают включением Д последовательно с сопротивлением . Если характеристики Д согласованы с аналогичными Т, то это нейтрализует изменение тока  под влиянием температурного приращения . Согласование характеристик обеспечивают диодным включением Т. Требуемое напряжение на базу Т ГСТ можно подавать также с помощью стабилитрона (вместо сопротивления ) или нескольких диодов. Иногда ГСТ, в которых ток вытекает из нагрузки, называют “поглотителями” тока, а со втекающим током – источниками(см. рис.1, а, б).

Реализация ГСТ на ПТ может быть проще: без отдельного источника смещения, т.е. по схеме двухполюсного включения. Такие ГСТ выполняют на ПТ с управляющим переходом и ПТ с изолированным затвором и встроенным каналом (рис. 1, в, г). Их выходное сопротивление равно , где ,  – внутреннее сопротивление и крутизна ПТ.

Существенный недостаток рассматриваемых ГСТ – относительно небольшое выходное сопротивление. Для его увеличения применяют двухтранзисторные ГСТ (рис. 1, д – ж). В генераторе на БПТ сопротивление и составляет сотни (тысячи) килоом, в ГСТ на ПТ оно определяется соотношением  ((), () – внутреннее сопротивление и крутизна транзистора VT1 (VT2)) и достигает единиц (десятков) мегаом. Для повышения тока  затвор ПТ VT1 можно подключить не к корпусу, а к истоку ПТ VT2, что уменьшает напряжение смещения ПТ VT1 и увеличивает его ток. Но выходное сопротивление ГСТ оказывается при этом меньше.

Напряжение на базе (затворе) Т приведенных ГСТ фиксировано. Если предусмотреть возможность его изменения, то получим программируемый ГСТ. В случае изменения этого напряжения по закону сигнала ток  отслеживает его, что соответствует управляемому генератору тока.

От ГСТ со смещением на основе согласованной пары Т легко перейти к так называемому токовому зеркалу (ТЗ), широко применяемому в схемотех-нике аналоговых ИС. ТЗ (отражателем тока) называют функциональный узел, у которого токи двух сходящихся в одну точку ветвей равны, причем входной  управляет выходным  (рис. 2, а). В рассматриваемом случае общей точкой является заземление. В выходную ветвь включена нагрузка и подается питающее напряжение. Входное сопротивление ТЗ мало, выходное – велико (в пределе ). Поэтому ток  не зависит от напряжения в точке 2, а определяется током . Коэффициент передачи  является основным параметром ТЗ. В общем случае ТЗ можно рассматривать как частный случай управляемого генератора тока. У него коэффициент  не обязательно равен 1.



а б

Рис. 2. Функциональная схема (а) и применение (б) токового зеркала

Наиболее часто ТЗ применяются в качестве ГСТ и динамических нагрузок Т дифференциального каскада, обеспечивая переход от симметричного выхода к несимметричному высокоомному. Рассмотрим последнее применение (рис. 2, б).

В исходном состоянии транзисторы VT1 и VT2 имеют равные коллекторные токи . Когда на дифференциальный вход поступает некоторое напряжение , первый из них, например , увеличивается до значения , а второй () уменьшается до величины . Ток  повторяется ТЗ, поэтому выходной ток каскада составляет  и равен сумме полезных составляющих обоих Т. Если же на базы транзисторов VT1 и VT2 поступит синфазное (относительно корпуса) приращение напряжения, то выходной ток будет равен нулю и  ( – коэффициент ослабления синфазного напряжения (синфазной помехи), показывающий, во сколько раз коэффициент передачи синфазного входного напряжения меньше, чем дифференциального). На практике , поэтому синфазная помеха подавляется не полностью.



а б в

Рис. 3 Реализация токовых зеркал

Простейшая (основная) схема ТЗ представлена на рис. 3, а. Предполагается, что транзисторы VT1 и VT2 одинаковы. Входной ток  вводится через добавочное сопротивление . Очевидно, в схеме , , , , а выходное сопротивление (с учетом формулы (1)) равно . Для уменьшения различия токов ветвей, что увеличивает значение параметра , в ТЗ вводят буферный Т VT3 (рис.3, б), который уменьшает разность токов в  раз. Поэтому . Выходное сопротивление такое же, как и в предыдущей схеме. Коллекторный ток VT3 намного меньше токов Т VT1 и VT2, из-за чего коэффициент  имеет низкое значение. Для увеличения тока иногда включают токоотводящее сопротивление .

Рассматриваемые ТЗ обладают относительно невысоким выходным сопротивлением. В результате ток  зависит от выходного напряжения, которое при высокоомной нагрузке может быть значительным. Это влечет за собой дополнительный разбаланс плеч, т.е. уменьшает коэффициент . Для увеличения сопротивления  применяют ТЗ со следящим напряжением второго Т, называемое ТЗ Уилсона (рис. 3, в). В нем эмиттер Т VT3 повторяет напряжение на коллекторе Т VT1, поэтому коллекторные напряжения Т VT1 и VT2 почти одинаковы и не зависят от выходного. Коэффициент  имеет то же значение, что и в основной схеме ТЗ. Выходное сопротивление существенно выше (порядка ), из-за чего схема не разбалансируется выходным напряжением и работоспособна при более высокоомной нагрузке. Дальнейшее повышение сопротивления  можно обеспечить включением в эмиттеры Т VT1 и VT2 сопротивлений, выбираемых порядка 1 кОм. Сказанное справедливо также для других ТЗ.

Если в ТЗ (см. рис. 3, а) к коллектору Т VT1, помимо Т VT2, подключить еще несколько Т со своими нагрузками, то получим схему с несколькими выходами. При этом возможна ситуация, когда один из выходных Т входит в режим насыщения, например, при отключении его нагрузки. Тогда база Т будет отбирать из общей линии повышенный ток, что уменьшит выходные токи других Т. Для исключения этого вводят буферный Т, аналогичный Т VT3 на рис. 3, б.

Для построения ТЗ, отражающего удвоенный (половинный) входной ток, необходимо в схеме (см. рис. 3, а) параллельно Т VT2 (VT1) подключить еще один Т. В ТЗ на ИС коэффициент  часто задают выбором размеров (площадей) эмиттерных переходов. Фирмой Texas Instruments выпускаются монолитные ТЗ с коэффициентом передачи 1,0 , 0,5 , 0,25 и 2,0 и рабочим диапазоном от 1,2 до 40 В . Возможным способом реализации ТЗ с кратными токами  и  является включение в цепь эмиттера выходного (входного) Т дополнительного сопротивления.

## 

## Генераторы стабильного напряжения

В схемотехнике аналоговых ИС широко применяют генераторы стабильного напряжения (ГСН) – двухполюсники, падение напряжения на которых слабо зависит от протекающего тока. Простейший ГСН – диод, через который протекает ток (от ГСТ или через сопротивление от ИП). В качестве диода обычно используют прямосмещенный эмиттерный переход Т, стабилизирующий напряжение на уровне примерно 0,65 В. Для увеличения напряжения  стабилизации применяют последовательное соединение двух Т в диодном включении либо схему рис. 4, а. В ней  (,  – напряжения база – эмиттер Т). Иногда с целью повышения тока Т VT1 дополнительно вводят шунтирующее сопротивление  величиной несколько килоом, что уменьшает его дифференциальное сопротивление. Дальнейшее увеличение  достигают цепями из трех (четырех) Т. Температурный коэффициент  напряжения, стабилизируемого прямым включением диодов, является отрицательным.



а б

Рис. 4. Схемы ГСН на транзисторах

Для получения малых значений  часто используют параллельное соединение делителя  и Т VT (рис. 4, б). Здесь напряжение  и, значит, ток через сопротивление  стабильны. Приращение внешнего напряжения приложено к сопротивлению  и изменяет ток базы, влияющий на ток коллектора. Напряжение стабилизации (пренебрегаем током базы) составляет . Варьируя значениями  и , можно регулировать величину . Очевидно, в схеме , где () – приращение тока (напряжения) ГСН;  – крутизна последнего. Поэтому выходное сопротивление рассматриваемого ГСН равно  и составляет примерно 50…200 Ом.

Вместо диодов в ГСН часто применяют стабилитроны. Они имеют следующие недостатки: конечный набор значений  и большой допуск на них (кроме дорогих прецизионных стабилитронов); большой уровень шума; достаточно большое дифференциальное сопротивление; зависимость напряжения  от температуры (например, стабилитрон с = 27 В из серии 1N5221 производства США имеет коэффициент = 0,1 % /град).



Рис. 5. Зависимость ТКН

Стабилитронов от напряжения

стабилизации и рабочего тока

Исследованиями фирмы Motorola, Inc. установлено, что в окрестности точки =6 В стабилитроны имеют значительно меньшее, чем при других напряжениях, дифференциальное сопротивление и почти нулевой коэффициент , который зависит от рабочего тока (рис. 5). Это связано с используемыми в стабилитронах двумя механизмами пробоя: зенеровским (туннельным) при низком и лавинном при высоком напряжении. С учетом отмеченных закономерностей применяют так называемые компенсированные опорные элементы в виде последовательного соединения стабилитрона с напряжением 5,6 В и прямосмещенного диода. Выбирая величину  и рабочий ток, можно компенсировать отрицательный температурный коэффициент диода, равный –2,1 мВ/град. Такой подход использован в производимых фирмой Motorola, Inc. дешевых опорных элементах с напряжением = 6,2 В, имеющих коэффициент  от 10–4 % /град (1N821) до 5⋅10–6 % /град (1N829). Указанные значения справедливы при токе = 7,5 мА. При этом в случае стабилитрона 1N829 приращение тока на 1 мА изменяет напряжение  в три раза сильнее, чем изменение температуры от –55 до +100 оС.



в

Рис. 6. Реализация ГСН на ИС



а б

Имея компенсированный опорный элемент VD с фиксированным напряжением = 6,2 В, можно построить с помощью буферного операционного усилителя DA1 ГСН на любое требуемое напряжение  (рис. 6, а). Опорный элемент, представляющий последовательное соединение стабилитрона и диода, включается в любой полярности. Необходимый рабочий ток его = 7,5мА задается сопротивлением , величина которого, например, при = 10 В составляет 510 Ом (при этом = 3,83 кОм и = 6,19 кОм ). По рассматриваемой схеме строятся так называемые стабилитронные ИС, обеспечивающие = 30⋅10–6 % /град. Они, как и их дискретные аналоги, обладают существенным недостатком: имеют высокий уровень шума, который сильнее в стабилитронах с лавинным пробоем (> 6 В). Для уменьшения шума используют стабилитронную структуру с так называемым захороненным, или подповерхностным, слоем.

В последнее время в ГСН в качестве опорных элементов все шире применяют так называемые стабилитроны с напряжением запрещенной зоны, которые было бы точнее назвать -стабилитронами (рис. 6, б). В них элементы VT1, VT2 и  образуют ТЗ с коэффициентом передачи < 1. Очевидно,

,

,

=,

 ,

,

где , ,  – напряжения база – эмиттер Т VT1…VT3;

,  – входной и выходной токи ТЗ;

 – падение напряжения на резисторе .

Из этого следует, что напряжение , в отличие от , имеет положительный температурный коэффициент. Поэтому, подбирая (в зависимости от тока) величину , можно обеспечить нулевой коэффициент , что, как оказывается, выполняется при  1,22 В (напряжение запрещенной зоны кремния при температуре абсолютного нуля). Ток  ТЗ задают при помощи сопротивления  или от ГСТ. Подключая рассматриваемый опорный элемент в предыдущую схему вместо стабилитрона VD, можно получить ГСН на любое требуемое напряжение.

В весьма распространенной схеме ГСН на основе -стабилитрона (рис. 6, в) элементы VT1, VT2 и  образуют ТЗ с коэффициентом передачи = 0,1. По аналогии со схемой рис. 6, б ток . Поэтому  и  = 1,22 В. Ток  создает на сопротивлении  напряжение  с положительным температурным коэффициентом, которое можно использовать в качестве выходного сигнала температурного датчика. Цепь отрицательной ОС (усилитель DA1, делитель , Т VT1 и VT2) дополнительно компенсирует возможные изменения . Существуют также другие варианты построения -стабилитро-нов, но все они основаны на ТЗ с кратным отношением токов и сложении напряжений  и вырабатываемого ТЗ.

Дальнейшие улучшение параметра  достигают температурной стабилизацией всего ГСН (термостатированием). Как известно, обычному термостатированию присущи громоздкость, сравнительно большая потребляемая мощность, медленные разогрев и выход на режим (10 и более минут). Поэтому в последнее время температуру стабилизируют на уровне кристалла (чипа) ИС, включая в состав последней нагревательную схему с температурным датчиком. Подход впервые опробован в 60-х годах фирмой Fairchild (США), выпустившей стабилизированную дифференциальную пару μА726 и предварительный усилитель постоянного тока μА727. Позже появились “термостатированные” ГСН, например, серии National LM399, которые имеют = 2⋅10–5 % /град. Такие ГСН производятся в стандартных транзисторных корпусах типа ТО-46, имеют нагреватели с мощностью потребления 0,25 Вт и временем выхода на режим не более 3 с. Они построены на стабилитронах с захороненным слоем. Отметим также, что на основе последних путем качественного схемотехнического решения фирмой Linear Technology (США) созданы ГСН без подогрева, имеющие = 0,05⋅10–6 % /град и на порядок лучшие характеристики по долговременной стабильности и шуму.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 2003. – 608 с.
2. Математическое моделирование и макромоделирование биполярных элементов электронных схем / Е.А. Чахмахсазян, Г.П. Мозговой, В.Д.Силин. – М.: Радио и связь, 1999. – 144 с.
3. Ногин В.Н. Аналоговые электронные устройства: Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 2002. – 304 с.