

# Источники опорного напряжения: основные параметры и принципы проектирования

Александр СМОРОДИНОВ  
smorodinov.a@ic-design.ru

**В современной технике для измерения физических величин, их постобработки, а также при управлении устройствами и формировании сложного вида сигналов нужны преобразователи данных из аналогового домена в цифровой и обратно. Эту роль выполняют аналого-цифровые (АЦП) и цифро-аналоговые (ЦАП) преобразователи. Для перехода из цифровой области в аналоговую и обратно цифровой/аналоговый сигнал нужно сравнивать с неким эталонным аналоговым сигналом — напряжением или током. Редко в качестве такого сигнала может выступать напряжение питания. Непредсказуемое поведение в пределах сотен милливольт от номинального значения, шумы и помехи от других схем делают такой вариант абсолютно нежизнеспособным даже для схем средней точности.**

В таких схемах, где требуется определенная точность, предсказуемость и малые шумы, в качестве формирователя эталонного сигнала (опорного напряжения) используют специальные микросхемы или блоки — источники опорного напряжения.

Источники опорного напряжения (ИОН) предназначены для формирования прецизионного малошумящего напряжения известной величины с минимальными температурными и временными дрейфами. ИОН могут применяться как источники эталонного напряжения для АЦП, ЦАП, для источников питания, источников эталонного тока и т. д.

Основными параметрами ИОН являются:

- исходная точность выходного напряжения;
- температурный дрейф в расчете на градус и диапазон температур, в котором он измерялся;
- шумы выходного напряжения;
- зависимость выходного напряжения от напряжения питания;
- зависимость выходного напряжения от тока нагрузки;
- временной дрейф выходного напряжения.

Приоритетность того или иного параметра при выборе ИОН зависит от приложения, в котором его планируется использовать. Так, в широкополосных преобразователях, предназначенных для обработки (генерирования) радиосигнала, исходная точность и дрейфы не столь важны, как шумы и подавление помех по питанию. Для измерительных же систем различные дрейфы — одни из важнейших параметров.

Исходная точность выходного напряжения определяется в процентах от идеального значения и приводится для комнатной температуры. Исходная точность различных ИОН может колебаться от нескольких процентов (для простейших, часто встроенных в другие микросхемы ИОН) до сотых долей процента для высокоточных ИОН.

Температурный дрейф принято измерять в миллионных долях выходного напряжения, отнесенных к изменению температуры на один градус Цельсия ( $\text{ppm}/^\circ\text{C}$ ). При выборе ИОН необходимо обращать внимание, каким методом получен данный параметр и в каком диапазоне температур. Исходя из единиц измерения, данный параметр является первой производной выходного напряжения по температуре, отнесенный к некоему номинальному значению, как правило, к напряжению при комнатной температуре. Однако измерять выходное напряжение даже с шагом в один градус Цельсия в процессе производства не представляется возможным, поэтому чаще всего используют трехточечный метод. Измерение выходного напряжения выполняется в трех точках: на краях температурного диапазона и при комнатной температуре. Из полученных значений находят минимальное и максимальное, и их разница делится на диапазон температуры и выходное напряжение при комнатной температуре, полученное значение умножается на  $10^6$ . Таким образом, полученное значение является некой аппроксимацией зависимости выходного напряжения от температуры линейной функцией. Конечно, это не соответствует действительности, а потому

на некотором диапазоне температур производная выходного напряжения может быть больше, чем указано в спецификации, однако на части температурного диапазона дрейф может оказаться нулевым.

Шумы выходного напряжения ИОН также являются важным параметром. Поскольку процесс преобразования представляет собой перемножение входного сигнала (аналогового или цифрового) на опорное напряжение, то и шумы опорного напряжения переносятся в выходной сигнал (цифровой или аналоговый). То есть чем больше входной сигнал, тем сильнее шумы опорного напряжения проявляются в выходном сигнале. Большие шумы опорного напряжения могут привести к сокращению динамического диапазона преобразователей и замаскировать слабый сигнал на фоне сильного. Как правило, приводят интегральное значение шума в небольшой полосе (0,1–10 Гц), где играет роль  $1/f$ -шум (может приводиться как среднеквадратическое отклонение шума, так и размах шумового напряжения) и спектральная плотность мощности шума на «полке» температурного (белого) шума. Интегральное значение приводят в мкВ, плотность мощности — в  $\text{nV}/\sqrt{\text{Гц}}$ .

Зависимость выходного напряжения от напряжения питания (Line regulation) тесно связана с параметром подавления помех по питанию (PSRR) и приводится в миллионных долях исходного напряжения к одному вольту изменения напряжения питания.

Зависимость выходного напряжения от тока нагрузки определяется как изменение выходного напряжения при изменении тока

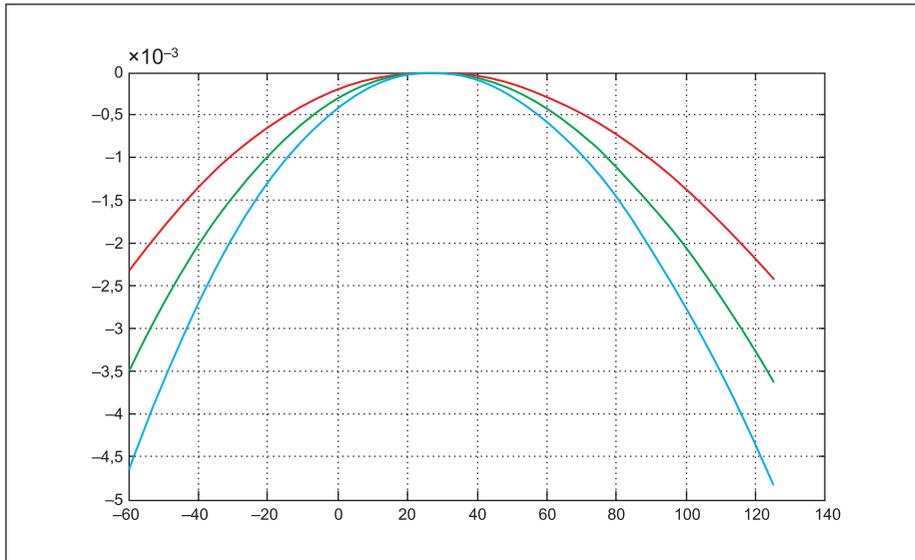


Рис. 1. Температурный дрейф идеального ИОН первого порядка с коэффициентами нелинейности 5, 4 и 3

нагрузки с 0 до максимального значения, отнесенное к значению на нулевом токе нагрузки, и приводится в ppm/мА.

Временной (долговременный) дрейф — изменение выходного напряжения от времени — определяется в ppm/1000 ч. Временной дрейф не является линейной функцией от времени, как правило, дрейф за первые 1000 ч намного выше, чем за следующие 1000 ч. Годовой дрейф — дрейф за 8766 ч рассчитывается как дрейф за 1000 ч, умноженный на  $\sqrt{8,77}$ , но даже эта цифра является достаточно пессимистическим прогнозом.

Существует три основных принципа формирования опорного напряжения, используемых в интегральных схемах:

- применение «потайного» стабилитрона (диода Зенера, у которого поверхности анода и катода не являются поверхностями микросхемы);
- применение пары полевых транзисторов с управляющим *p-n*-переходом (JFET) с различным напряжением отсечки;
- применение напряжения запрещенной зоны кремния (band-gap reference).

Все три метода имеют свои достоинства и недостатки, однако первые два требуют такие этапы производства микросхем, которые недоступны компаниям, работающим на стандартных процессах. Кроме того, схемы с диодом Зенера недоступны для низких выходных напряжений.

Наиболее популярным и доступным методом построения ИОН, который обладает отличной степенью интеграции на одном кристалле с современными АЦП/ЦАП, является метод, основанный на ширине запрещенной зоны кремния. Существует много вариантов схем, использующих данную величину в качестве эталонного напряжения, но базовый принцип у всех один. Ниже представлено уравнение зависимости напряжения база-эмиттер биполярного транзистора

от температуры и тока коллектора  $V_{BE}(H, I_C)$ , где  $H = T/T_N$  — температура, нормированная относительно комнатной,  $T$  — температура,  $T_N$  — комнатная температура.

$$V_{BE}(H, I_C) = E_{GE} - H \times (E_{GE} - V_{BE_N}) + VT_N \times H \times \ln(I_C/I_N) - \eta \times H \times \ln(H),$$

где  $E_{GE}$  — напряжение запрещенной зоны легированного кремния, зависит от конкретного процесса и составляет 1,14–1,19 В;  $V_{BE_N}$  — напряжение база-эмиттер, измеренное при комнатной температуре на токе коллектора  $I_N$ ;  $VT_N = k \times q / T_N$ , где  $k$  — постоянная Больцмана, а  $q$  — заряд электрона;  $\eta$  — коэффициент нелинейности характеристики, определяемый экспериментально и находящийся в диапазоне от 3 до 5,5.

Как видно из уравнения, основным членом, влияющим на температурное поведение напряжения база-эмиттер, является отрицательный линейный коэффициент  $(E_{GE} - V_{BE_N})/T_N$ , который и обуславливает основной отрицательный наклон характеристики  $\approx -2$  мВ/°С. Таким образом, первой задачей при проектировании ИОН является компенсация этого отрицательного температурного коэффициента.

Предположим, что транзистор запитан током коллектора, который имеет положительный температурный коэффициент (так называемый РТАТ-ток) и равен  $I_C = \lambda \times H \times I_N$ . В этом случае получаем следующую зависимость напряжения база-эмиттер:

$$V_{BE}(H, I_C) = E_{GE} - H \times (E_{GE} - V_{BE_N} - \lambda \times VT_N) - (\eta - 1) \times VT_N \times H \times \ln(H).$$

Запитка транзистора РТАТ током позволяет уменьшить на 1 коэффициент нелинейности температурной характеристики. Если продифференцировать полученное уравнение по температуре, то окажется, что для

устранения отрицательного наклона характеристики к ней необходимо добавить РТАТ-напряжение, которое при номинальной (комнатной) температуре должно иметь значение:

$$V_{PTAT} = (E_{GE} - V_{BE_N} - \lambda \times VT_N) - (\eta - 1) \times VT_N.$$

Таким образом, в идеальном случае останется только дрейф, связанный с коэффициентом нелинейности. На рис. 1 показано отклонение выходного напряжения от напряжения при комнатной температуре в зависимости от температуры для  $\eta = 5, 4$  и 3.

Для формирования напряжения с положительным температурным коэффициентом очень удобно использовать разницу напряжений база-эмиттер двух транзисторов, через которые протекают токи разной плотности, в этом случае:

$$\Delta V_{BE} = (k \times T) / q \times \ln(M),$$

где  $M$  — отношение плотности токов. Прилагая такое напряжение к резистору с нулевым ТКС, можно получить требуемый РТАТ-ток с  $\lambda = 1$ , пропуская полученный ток через второй резистор также с нулевым ТКС — искомое РТАТ-напряжение для суммирования его с  $V_{BE}$  диода и получения температурной характеристики с рис. 1.

Существует несколько базовых схем ИОН первого порядка, такие как схема Видлара, например, но наибольшей популярностью пользуется ячейка Брокау (рис. 2).

Большинство ИОН, особенно это касается ИОН, встроенных в микросхемы АЦП/ЦАП, являются ИОН первого порядка, то есть микросхемами, в которых осуществляется коррекция только первого порядка, но остается коэффициент, имеющий параболический вид:

$$(\eta - 1) \times VT_N \times H \times \ln(H).$$

Даже в случае идеального подбора компонентов (резисторов и транзисторов) температурный дрейф такого ИОН в диапазоне температур будет составлять не менее 16 ppm/°С (для  $\eta = 4$ ) при измерении трехточечным методом и более 30 ppm/°С на краях температурного диапазона, если анализировать кривую более точно. Разброс компонентов приводит к тому, что точка нулевого ТКС выходного напряжения смещается с комнатной температуры и температурный дрейф может составлять выше 60 ppm/°С. На практике даже схемы ИОН первого порядка нуждаются в тримминге для получения температурных дрейфов менее 30–40 ppm/°С.

Некоторые измерительные системы требуют гораздо меньших температурных дрейфов — не более 5 ppm/°С. Получить такие параметры без коррекции нелинейного коэффициента, как было показано выше, невозможно. Необходимо строить ИОН высокого порядка с той или иной коррекцией температурной нелинейности.

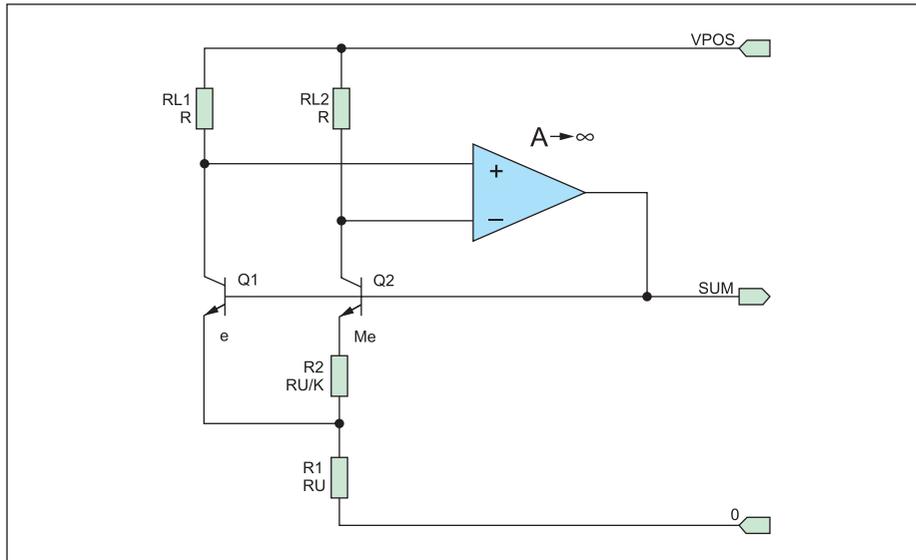


Рис. 2. Ячейка Брокау

Существует много вариантов компенсации нелинейного коэффициента в схемах ИОН, вот некоторые из них:

- компенсация за счет отрицательного ТКС резисторов;
- так называемая «полная» компенсация;
- компенсация РТАТ-токами высокого порядка.

Рассмотрим для примера первый вариант.

На рис. 2 изображена ячейка Брокау как одна из самых популярных схем формирования опорного напряжения.

В данной схеме разница плотности токов (за счет разной площади транзисторов) в транзисторах Q1 и Q2 и резистор R2 создает ток:

$$I_{PTAT} = (k \times T) / q \times \ln(M) \times (1/R2),$$

который в свою очередь на резисторе R1 создает РТАТ-напряжение, компенсирующее линейный отрицательный температурный коэффициент напряжения  $V_{BE}$ . Однако если резистор R2 имеет ненулевой ТКС, ток, протекающий через биполярные транзисторы, перестает быть линейным от температуры. Нелинейная зависимость тока компенси-

рует нелинейный коэффициент напряжения  $V_{BE}$ . Отрицательный ТКС резисторов снижает температурную нелинейность опорного напряжения.

Основной принцип «полной» компенсации заключается в выделении тем или иным способом остаточного нелинейного напряжения, в зависимости от температуры после компенсации первого порядка, преобразования данного напряжения в ток и подачи данного тока в один из узлов (чаще всего в R1) ИОН. Наиболее часто для формирования остаточного нелинейного напряжения используется разница  $V_{BE}$  двух транзисторов, один из которых запитывается РТАТ-током, а второй ток с ТКС, близким к нулю.

Компенсация током РТАТ высокого порядка осуществляется путем запитки транзисторов ядра ИОН током, нелинейно возрастающим по температуре, один из вариантов — степень тока РТАТ должна быть равна нелинейному коэффициенту  $V_{BE}$  данного технологического процесса.

Более подробно узнать о способах нелинейной компенсации можно из источников, приведенных в списке литературы.

Таблица. Микросхема ИОН со следующими целевыми характеристиками

Параметр	Значение
Ряд выходных напряжений, В	1,25; 2,048; 2,5; 3; 3,3; 4,096
Исходная точность выходного напряжения	Лучше 0,1%
Температурный дрейф в диапазоне: -60...+125 °C -40...+85 °C	<10 ppm/°C <5 ppm/°C
Нагрузочный ток, мА	До ±10
Размах шумов в полосе 0,1–10 Гц	<5 мкВ для напряжения 1,25 В
Подавление помех по цепям питания на частоте 1 кГц	>80 дБ
Ток потребления	<3 мА

Создание хорошей микросхемы ИОН не ограничивается только компенсацией нелинейного коэффициента температурной характеристики напряжения база-эмиттер.

Микросхема ИОН должна обладать высокой устойчивостью к помехам по цепи питания, хорошей нагрузочной способностью, малыми шумами. Для того чтобы обеспечить хороший выход годных, в микросхеме должна быть предусмотрена система калибровки технологического процесса и разбросов от микросхемы к микросхеме. В микросхеме должен быть реализован простой механизм перехода от одного выходного напряжения к другому в процессе производства и калибровки.

На данный момент в компании «Миландр» разрабатывается микросхема ИОН со следующими целевыми характеристиками (таблица).

Микросхема функционально состоит из: ядра ИОН со схемой коррекции нелинейного температурного коэффициента; масштабирующего усилителя, с программируемым коэффициентом усиления; цифровой схемы управления массивом пережигаемых переключателей; набора калибровочных ЦАП.

Выходное напряжение будет задаваться в процессе производства путем программирования пережигаемых переключателей. Также будет калиброваться температурный наклон и исходная точность выходного напряжения.

Создание подобной микросхемы позволит решить проблему отсутствия на рынке отечественной микросхемы ИОН с низкими дрейфами для широкого диапазона температур.

## Литература

1. Brokaw P. A simple three-terminal IC bandgap reference. JSSC, December 1974.
2. Huising J., Van De Plassche R., Sansen W. Analog Circuit Design: Low-Noise, Low-Power, low-Voltage; Mixed-Mode Design with CAD Tools; Voltage, Current and Time Reference. Springer, 1998.
3. Gilbert B. The Design of BiCMOS Bandgap reference. MEAD Power Management Seminar. Lausanne, 2014.
4. Popa C. R. Superior-Order Curvature-Correction Techniques for voltage Reference. Springer, 2009.