

Прецизионные источники опорного напряжения компании Apex Microtechnology

Константин ВЕРХУЛЕВСКИЙ
info@icquest.ru

С ростом разрядности высокоточных измерительных систем возникает потребность в прецизионных источниках опорного напряжения (ИОН). Целью настоящей статьи является обзор предлагаемых компанией Apex Microtechnology интегральных ИОН с превосходными рабочими характеристиками. Приведены схематехнические рекомендации и особенности практического применения ИОН в составе измерительного оборудования.

Введение

Как известно, источник опорного напряжения — это базовый электронный элемент, главной задачей которого является поддержание на своем выходе высокостабильного постоянного электрического напряжения независимо от изменений нагрузки, воздействия внешних факторов и срока эксплуатации. Прецизионные ИОН применяются во многих случаях: в системах связи, зарядных устройствах, стабилизированных источниках электропитания, в составе измерительных приборов в качестве эталонов напряжения для задания пределов измерения. Но чаще всего необходимость в них возникает при построении аналогово-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей (АЦП и ЦАП). Это подтверждается хотя бы тем фактом, что значительный спрос на ИОН возник только с началом производства первых интегральных АЦП и ЦАП.

В отличие от систем электропитания, где зачастую можно обойтись компонентами с не слишком высокими характеристиками, в измерительной технике рабочие параметры ИОН могут иметь определяющее значение. Особенно важны уровень шумов, значение

которого возрастает с повышением разрешения измерительного устройства, а также временной и температурный дрейф. Так, для обеспечения дополнительной температурной погрешности в схеме с 14-разрядным АЦП, равной 0,5 МЗР в диапазоне температур $-40...+85\text{ }^{\circ}\text{C}$, температурный коэффициент опорного напряжения (ТКН) ИОН должен быть не более $0,5\text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ [1].

Несмотря на то, что затраты на ИОН обычно составляет малую часть от стоимости системы в целом, результирующие характеристики прецизионных устройств, такие как точность и стабильность измерения, напрямую зависят от используемых в них источников.

В аппаратуре сбора данных применяются АЦП со встроенными либо внешними ИОН. Для задач, не критичных к точности измерения, обычно хватает возможностей встроенного источника. При этом во всем рабочем диапазоне температур в лучшем случае обеспечивается 10-битная разрешающая способность. Для примера, чтобы обеспечить точность работы в 0,5 МЗР интегрируемого во многие микроконтроллеры 10-битного АЦП, необходимо, чтобы изменение выходного напряжения ИОН не превышало 1,22 мВ

(для ИОН на напряжение 2,5 В). В случае встроенного ИОН, который не предусматривает возможности подстройки выходного напряжения, в этот уровень должно уложиться изменение выходного напряжения, вызванное влиянием как температурного дрейфа, так и начальной ошибкой установки. Таким образом, при обоснованном подходе к выбору ИОН для повышения точности прецизионных устройств с разрядностью 12 и более бит, возникает потребность в применении внешнего ИОН. К очевидным преимуществам данного решения относятся возможность выбора ИОН с требуемым выходным напряжением, с высокой нагрузочной способностью и малым уровнем шума, а также с наличием различных вспомогательных функций.

Практически все известные производители аналоговых электронных компонентов имеют свои линейки ИОН. Среди наиболее крупных следует отметить Analog Devices, Fairchild Semiconductor, Intersil, Maxim Integrated Products, Microchip Technology, Microsemi, National Semiconductor, ON Semiconductor, Semtech, Texas Instruments. Продукция компании Apex Microtechnology (производителя микросхем, разработанных несуществующей более Thaler Corporation) не отстает, а по ряду рабочих характеристик и превосходит своих конкурентов.

О компании Apex Microtechnology

Компания, основанная в 1980 г., на протяжении более 30 лет является мировым лидером в разработке и производстве мощной аналоговой электроники. В настоящее время каталог продукции включает в себя более 300 наименований различных электронных компонентов с выдающимися рабочими характеристиками. К большинству изделий от Apex можно добавить определение «впервые в мире». Номенклатура электронных компонентов включает в себя мощные операционные усилители, ШИМ-усилители, усилители и контроллеры для управления электродвигателями. Инновационные интегральные гибридные схемы и модули находят широкое применение в системах управления технологическими процессами, в аэрокосмических системах и аппаратуре военного назначения, в приводах электрических двигателей, для питания пьезопреобразователей, в источниках питания с программным управлением и других мощных устройствах, требующих прецизионного управления. В 2007 г. Apex Microtechnology была приобретена компанией Cirrus Logic и последующие пять лет продукция компании выпускалась под маркой APEX Precision Power. В 2012 г. при помощи группы инвесторов Apex Microtechnology отделилась от Cirrus Logic, унаследовав при этом семейство высокоточных ИОН, выпускаемых ранее компанией Thaler Corporation.

Прецизионные ИОН компании Apex Microtechnology

Использование наработок, полученных в результате приобретения компании Thaler Corporation, позволило выйти на рынок высокоточных источников опорного напряжения с продукцией, обладающей отличными показателями начальной ошибки, температурного дрейфа, теплового гистерезиса и шума. Убедиться в этом поможет таблица, где представлены основные параметры представителей семейства VRExxx [2]. Большинство

ИОН серии VRExxx рассчитаны на работу при напряжении питания от ±13,5 до ±22 В, а собственный ток потребления не превышает 5–7 мА. Новинки VRE3025 и VRE3050 отличаются расширенным диапазоном (8–36 В).

В настоящее время доступны более 25 моделей с выходными ультра стабильными одно- и двухполярными напряжениями от +2,5 до ±10 В, предназначенные для эксплуатации в коммерческом и промышленном диапазонах рабочих температур. Устройства, в маркировке которых имеется суффикс «М», позиционируются для применения в военном и аэрокосмическом оборудовании и проходят дополнительный отбор для обеспечения высоких показателей надежности. Они гарантируют высокостабильное выходное напряжение при температурах –55...+125 °С.

Внутренняя структура и принцип действия

Линейка высокоточных ИОН компании Apex Microtechnology представляет собой гибридные интегральные схемы, изготавливаемые с применением технологии Apex Precision Power, что упрощает проектирование разрабатываемых устройств и одновременно повышает их надежность. Гибридные микросхемы содержат все необходимые активные и пассивные элементы, расположенные на керамической подложке. Применение данного подхода позволяет значительно снизить количество внешних компонентов в схеме и тем самым сократить время, затрачиваемое на разработку и внедрение. Поэтому при подключении ИОН необходим только источник питания. Для получения прецизионных характеристик рекомендуется питать ИОН при помощи линейного стабилизатора напряжения, который примет на себя решение многих проблем, связанных с фильтрацией шума, подавлением переходных процессов на входе питания и т. д. Кроме того, показатели большинства ИОН можно улучшить, зашунтировав их входы и выходы на землю конденсаторами. Структурная схема на примере ИОН VRE304 представлена ниже на рис. 1 [3].

Основным узлом микросхемы является диод Зенера (для ИОН VRE304 с рабочим напряжением 6,3 В). Источник тока на полевом транзисторе используется для смещения диода, напряжение стабилизации через делитель на резисторах R1 и R2 поступает на неинвертирующий вход прецизионного операционного усилителя, где увеличивается до номинального напряжения 4,5 В. Коэффициент усиления при этом определяется выражением:

$$G = 1 + R4/R3.$$

Установка требуемого выходного напряжения осуществляется путем использования регулирующей цепи обратной связи, состоящей из пленочных резисторов и термисторов. Изначально зависимость напряжения

Таблица. ИОН компании Apex Microtechnology

Наименование	Выходное напряжение, В	Начальная ошибка, мВ	Температурный коэффициент, ppm/°C	Уровень в выходного шума, мкВ	Тепловой гистерезис, ppm	Длительный дрейф, ppm/1000 ч	Нестабильность по входу, ppm/В	Тип корпуса	Примечание
VRE100/102	±10	±1; ±1,2; ±1,5; ±1,7	1,09; 1,11; 1,33; 1,45	6	1	6	3	DIP-14	Высоконадежный
VRE104	4,5	±0,8; ±0,9	1,48; 1,62; 1,7; 1,98	3	1	6	6	DIP-14	Для АЦП
VRE107	±5	±0,8; ±0,9	1,33; 1,56	3	1	6	6	DIP-14	Высоконадежный
VRE204	4,5	±0,8; ±0,9	1,48; 1,70	3	1	6	6	LCC-20	Малогобаритный
VRE205	5	±0,8; ±0,9	1,33; 1,45; 1,56; 1,82	3	1	6	6	LCC-20	Малогобаритный
VRE210	10	±0,5; ±0,7; ±0,8; ±1	1,09; 1,11; 1,33; 1,45	6	1	6	3	LCC-20	Малогобаритный
VRE302	2,5	±0,4; ±0,6	1; 2,2	1,5	1	6	6	DIP-8; SMT-8	Бюджетный
VRE3025	2,5	±0,25; ±0,375; ±0,5	0,6; 1; 2	1,5	1	6	5	DIP-8; SMT-8	С питанием +10 В
VRE304	4,5	±0,45; ±0,9	0,6; 2	3	3	6	6	SMT-8	Бюджетный
VRE305	5	±0,5; ±0,8; ±1	0,6; 1; 2	3	1	6	6	DIP-8; SMT-8	Бюджетный
VRE3050	5	±0,5; ±0,8; ±1	0,6; 1; 2	3	1	6	5	SMT-8	С питанием +10 В
VRE306	6	±0,6; ±1,2	0,6; 2	3	1	6	6	SMT-8	Бюджетный
VRE310	10	±1; ±1,6; ±2	0,6; 1; 2	6	1	6	6	DIP-8; SMT-8	Бюджетный
VRE410	±10	±1,6; ±2; ±2,2	1; 2; 2,2	6	1–3	6	6	SMT-14	Сдвоенный

на диоде от температуры сильно нелинейная. Высокая точность начальной установки выходного напряжения и стабильность в значительной степени зависят от возможности скомпенсировать эту нелинейность. Это достаточно сложная задача, учитывая широкий диапазон рабочих температур –55...+125 °С. Решение данной проблемы достигается лазерной подгонкой номиналов пленочных резисторов, используемых во встроенных корректирующих нелинейных цепях, а также благодаря комплексному тестированию каждой составляющей микросхемы на всех стадиях производства.

После окончания внутреннего монтажа каждая ИС подвергается начальным электрическим и тепловым испытаниям с целью выявления ранних отказов [4]. По их результатам компоненты с незначительными дефектами отправляются на переработку. Далее на ИОН подается питание, измеряется выходное напряжение во всем диапазоне рабочих температур и сравнивается с ожидае-

мыми значениями. Полученные показатели от каждого устройства сохраняются, и при помощи собственных программных алгоритмов осуществляется автоматическая лазерная подгонка номиналов резисторов. Каждый ИОН требует персональной подгонки с несколькими итерациями измерения до тех пор, пока выходное напряжение не примет требуемого значения. Применяемые пленочные резисторы имеют долговременную температурную стабильность. После того, как подстройка завершена, изделия герметизируются и подвергаются тестам на надежность, которые включают в себя дополнительную термоэлектротренировку, термоциклирование и виброиспытания. Также выполняется проверка на герметичность. Таким образом, каждый компонент проводит один день на калибровке и семь суток на испытаниях на надежность. Всесторонние исследования гарантируют, что до потребителя дойдет только безотказная продукция с высоким качеством изготовления.

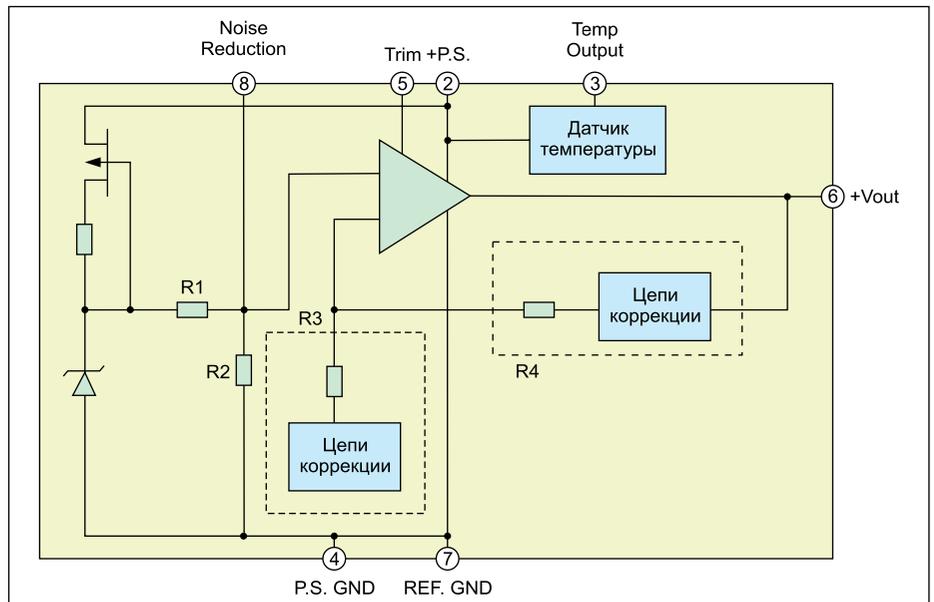


Рис. 1. Внутренняя структура ИОН VRE304



Рис. 2. Внешний вид прецизионных ИОН компании Apex Microtechnology

В настоящее время при производстве ИОН Apex Microtechnology используются герметичные керамические корпуса LCC-20, SMT-8, DIP-8 и DIP-14, внешний вид которых показан на рис. 2. Механические напряжения печатной платы, возникающие при ее монтаже и при последующей эксплуатации устройства, неизбежно передаются на корпус микросхемы и далее на кристалл ИОН и влияют на его выходное напряжение и долговременную стабильность. Данное замечание касается в основном DIP-корпусов, планарные микросхемы практически не подвержены этому эффекту. Для уменьшения механических напряжений используются специальные конструкторские приемы. В справочных данных на VRExxx рекомендуется устанавливать микросхемы на краю печатной платы, где минимальны механические напряжения и перегрев, уменьшать размеры печатной платы и выбирать более толстый текстолит. Дополнительно уменьшить воздействие можно, сделав вокруг микросхемы U-образный вырез, отделенный от остальной платы сквозным пропилом.

Области применения:

- автоматизированное испытательное оборудование;
- медицинская аппаратура;
- АСУ технологическими процессами;
- сверхчувствительное сейсмическое оборудование;
- системы впрыска топлива;
- системы наведения.

Кроме того, высокое качество и надежность позволяют использовать компоненты в жестких условиях эксплуатации при значительных колебаниях температур, а также в оборудовании подземного, наземного и аэрокосмического базирования.

Основные рабочие характеристики и рекомендации по использованию ИОН Apex Microtechnology

Так как основной задачей ИОН является генерация заведомо известного напряжения,

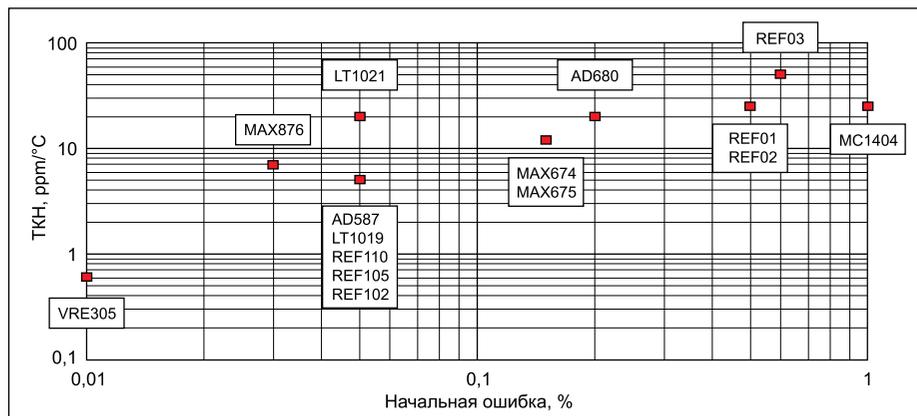


Рис. 3. Основные характеристики широко применяемых ИОН

то главными критериями их выбора являются точность и стабильность. Чем более жесткие требования предъявляются к точности ИОН, тем шире набор нормируемых показателей. Наиболее полный набор характеристик ИОН отражает запросы конструкторов высокоточных АЦП и включает в себя начальную ошибку установки выходного напряжения, ТКН, длительный дрейф (погрешность, появляющаяся при длительном включении), уровень шума, нестабильность по входу и выходу, время включения и ток потребления. Для большинства применений ключевыми являются первые четыре характеристики. Для недорогих стабилизаторов напряжения может нормироваться единственный показатель — начальный разброс или допустимый диапазон изменений выходного напряжения (верхняя и нижняя граница).

В настоящее время на практике широко используются два типа ИОН: бандгапы (источники опорного напряжения, величина которого определяется шириной запрещенной зоны используемого полупроводника) и ИС на основе диодов Зенера. Бандгапы менее дорогие и обычно используются в разработках с разрешающей способностью не более 10 бит. Они отличаются начальной ошибкой 0,5–1%, ТКН примерно 25–50 ppm/°C, длительным дрейфом 20–30 ppm и шумом на выходе 15–30 мВ (от пика до пика в диапазоне частот 0,1–10 Гц). ИОН на основе диодов Зенера предназначены для более прецизионных систем. Они обычно имеют начальную ошибку 0,04–0,06%, ТКН 5–20 ppm/°C, шум менее 10 мВ и значение длительного дрейфа 10–15 ppm. Компания Apex Microtechnology добилась улучшенных основных характеристик (начальная ошибка 0,01–0,02%, ТКН 0,6 ppm/°C) путем лазерной настройки корректирующих цепей во всем диапазоне рабочих температур. Для примера на рис. 3 представлено сравнение ключевых характеристик ИОН VRE305 с другими широко представленными ныне на рынке микросхемами, выпускаемыми в DIP-корпусах [5]. Рассмотрим подробнее основные характеристики ИОН компании Apex Microtechnology.

Начальная ошибка

Начальная ошибка выходного напряжения — это предельное отклонение постоянного напряжения на выходе ИОН от номинального при первом включении ИС. Определяется при комнатной температуре (+25 °C), входном напряжении и выходном токе, заданных производителем.

Если первые микросхемы имели отклонение выходного напряжения от номинального значения до $\pm 4\%$ (например TL431), то в последних разработках компании Apex Microtechnology при помощи лазерной подгонки значение этого параметра доведено до $\pm 0,01$ – $0,02\%$. Полученная величина позволяет использовать данные ИОН даже в стандартном исполнении в измерительных системах с разрядностью не менее 12 бит. Например, источник опорного напряжения VRE305 с выходным напряжением 5 В имеет начальную ошибку 0,5 мВ или 0,01%, что не превышает погрешность преобразования в единицу МЗР (разрешающая способность эквивалентна $5/4096 = 1,22$ мВ). Учитывая, что большая часть ИОН линейки VRExxx имеет вывод регулировки Trim, позволяющий подстроить выходное напряжение к необходимому значению без ухудшения других характеристик, то, без учета прочих ограничений (температурного дрейфа, шума и т. д.), разрядность может быть увеличена до 16 бит. Подключение потенциометра к этому выводу позволяет корректировать выходное напряжение в пределах $\pm 2,5$ – ± 20 мВ для разных моделей. Чтобы нестабильность потенциометра не ухудшила показатели ИОН, имеет смысл применять металло-фольговые прецизионные подстроечные резисторы с температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) около ± 10 ppm/°C. Цифровые потенциометры для таких задач не подходят из-за ТКС более 500 ppm/°C.

Температурный коэффициент напряжения (ТКН)

Данная характеристика показывает зависимость выходного напряжения от изменения температуры окружающей среды. ТКН деше-

вых серийных интегральных ИОН ограничен величиной в 10 ppm/°C. Снижение ТКН бандгапов и стабилизированных ИОН до уровня менее 5 ppm/°C требует существенного удорожания технологии, а практический предел гарантированного ТКН серийных изделий равен 1 ppm/°C. Для получения меньшего температурного коэффициента в ИОН компании Apex Microtechnology применяется технологический прием, получивший название buried Zener. При этом для повышения стабильности p-n-переход формируется под поверхностью полупроводникового материала и отделяется от нее защитным диффузионным слоем, что позволяет снизить влияние механических напряжений, загрязнений и нарушений кристаллической решетки, которые сильнее всего проявляются на поверхности. Как уже было сказано выше, для интегральных ИОН характерна существенно нелинейная зависимость выходного напряжения от температуры. Поэтому часто температурный дрейф ИОН нормируется в нескольких диапазонах температур, что позволяет вполне объективно оценить качество ИОН применительно к конкретным условиям эксплуатации и точностным характеристикам аппаратуры. К примеру, сверхпрецизионный ИОН VRE3050 обладает ТКН 1 и 0,6 ppm/°C и может применяться в предназначенных для работы в промышленном диапазоне рабочих температур системах с разрешающей способностью 14 бит (рис. 4). Помимо прочего, путем использования вывода Temp возможно осуществлять контроль внутренней температуры кристалла. Данная функция вполне применима в схемах температурной компенсации.

Важность учета ошибки, возникающей при изменении температурных условий эксплуатации, иллюстрируется следующим примером. Рассмотрим два ЦАП:

- 16 битный DAC701 со встроенным ИОН (рис. 5);
- AD7545, применяемый совместно с ИОН VRE100MA (рис. 6).

Ошибка из-за влияния температуры определяется выражением:

$$\Delta V = LE + \text{TKH} \times \Delta T,$$

где ΔT — отличие рабочей температуры от комнатной (+25 °C); LE — ошибка, вызванная нелинейностью характеристики.

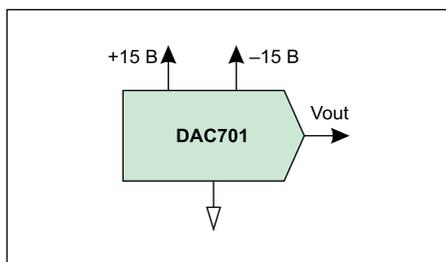


Рис. 5. Схема подключения 16-битного ЦАП DAC701 со встроенным ИОН

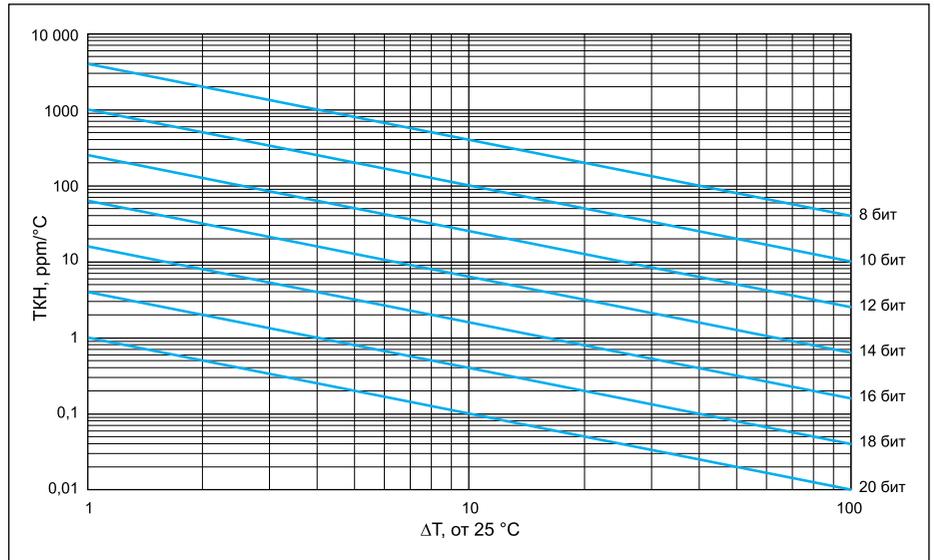


Рис. 4. Зависимость ТКН от температуры для систем с различной разрешающей способностью

LE выражается в процентах и определяется согласно формуле:

$$LE = (1/2)^n \times \text{МЗР} \times 100\%,$$

где n — разрешающая способность преобразователя; МЗР — величина младшего значащего разряда.

В формуле подразумевается, что остальные ошибки устранены:

- AD7545: LE = 0,012% и ТКН = 2 ppm/°C. Стоит отметить необходимость правильного подбора АЦП с соответствующим уровнем температурного дрейфа. Также учитывается ТКН ИОН VRE100MA 0,5 ppm/°C.
- DAC701: LE = 0,003% и ТКН = 15 ppm/°C. Тогда при комнатной температуре ошибка DAC701 в четыре раза меньше (0,012/0,03 = 4), а при температуре +125 °C:
- AD7545: $\Delta V = 0,012 + 2,5 \times 100 = 0,037\%$;
- DAC701: $\Delta V = 0,003 + 15 \times 100 = 0,153\%$.

Теперь наоборот, ошибка DAC701 почти в пять раз больше. Таким образом, с ростом температуры (для данного случая с $\Delta T = 7,2$ °C) 16-битные системы с более высокой разрядностью и со встроенным ИОН становятся менее точными по сравнению с 12-битными схемами с внешним прецизионным ИОН.

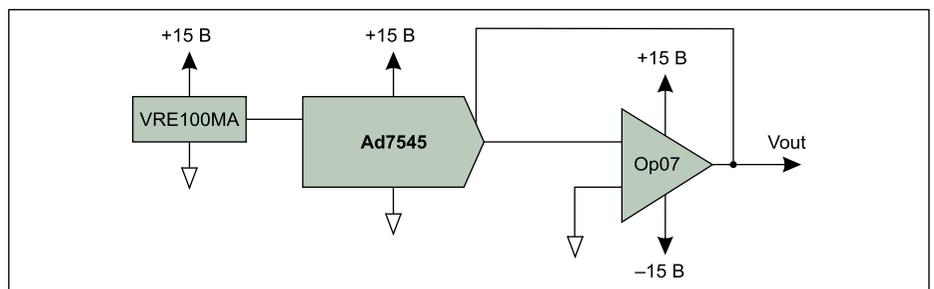


Рис. 6. Использование ИОН VRE100MA совместно с 12-битным ЦАП AD7545

Длительный дрейф

Выходное напряжение ИОН изменяется в процессе эксплуатации. Это изменение характеризуется параметром длительного дрейфа, который обычно имеет вид систематического нарастания или уменьшения опорного напряжения. Временное изменение выходного напряжения имеет нелинейный характер, скорость дрейфа убывает экспоненциально, при этом значение дрейфа за вторую тысячу часов примерно вдвое меньше, чем за первую тысячу, и т. д. С течением времени скорость длительного дрейфа падает, а выходное напряжение стабилизируется. Производители обычно нормируют максимальную величину дрейфа, допустимую в первые 1000 ч эксплуатации и выражаемую в ppm/1000 ч. Наименьшие показатели дрейфа, от 5 до 10 ppm на свойственны ИОН на стабилизаторах со скрытой структурой. В рассматриваемых прецизионных ИОН гарантируется длительный дрейф, не превышающий 6 ppm/1000 ч.

Шум

Выходное напряжение любого ИОН имеет шумовую составляющую, которая может затруднить измерения с высокой разрешающей способностью. Шумы прецизионных ИОН обычно нормируются в двух частотных диапазонах: 0,1–10 Гц и 10–1 кГц. Для

большинства качественных ИОН в справочных данных приводятся обе величины. Фильтрация шума при помощи внешних пассивных либо активных фильтров применима только на верхнем диапазоне частот. Для подключения корректирующей емкости многие микросхемы семейства VRExxx снабжены специальным выводом [6]. На частотах ниже 10 Гц расчетные емкости конденсаторов фильтра, а вместе с ним и ожидаемые утечки тока через эти конденсаторы возрастают настолько, что нивелируют любые выгоды от фильтрации. Поэтому для высокоточных измерительных устройств важно выбирать компоненты с минимальным значением этого параметра. Уровень выходного шума ИС линейки VRExxx лежит в пределах 1,5–6 мкВ для разных моделей, что соответствует показателям сверхпрецизионных ИОН.

Тепловой гистерезис

Данный вид погрешности возникает в результате тепловых испытаний и представляет собой разницу между показаниями ИОН в начале и в конце тестового цикла. Причина подобного явления в следующем: кремниевый кристалл, корпус и другие составляющие

микросхемы имеют неодинаковые коэффициенты теплового расширения. При нагревании происходит неравномерное расширение, и возникают механические напряжения, которые сохраняются и после охлаждения. Типичное значение этого параметра составляет около ± 20 ppm. Прецизионные ИОН Apex Microtechnology значительно превосходят данные показатели, в худшем случае производитель обещает уход от номинального значения на 3 ppm.

Нестабильность по входу и нагрузке

Эти параметры показывают, насколько изменится выходное напряжение при колебаниях входного напряжения и тока нагрузки. Нестабильность по входу у всех ИОН VRExxx составляет не более 5–6 ppm/V, а по нагрузке 3–8 ppm/мА (во всем рабочем диапазоне температур).

Заключение

Источник опорного напряжения — ключевой элемент прецизионных измерительных схем, к выбору которого необходимо отнестись со всей серьезностью. Линейка ИОН

от компании Apex Microtechnology поможет разработчикам сделать правильный выбор. Высокоточные источники опорного напряжения, обеспечивающие стабильное выходное напряжение независимо от срока эксплуатации, влияния температуры $-55 \dots +125$ °С и внешних воздействий могут быть полезны для широкого спектра решаемых задач. Сочетание отличных показателей долговременной надежности с высокими точностными характеристиками позволяют выразить надежду, что данные микросхемы найдут свое применение. ■

Литература

1. Пушкарев М. Интегральные источники опорного напряжения // Компоненты и технологии. 2007. № 6.
2. www.apexanalog.com
3. VRE304: Precision Voltage Reference. Datasheet. September, 2012.
4. Gradincic Z. High-Precision, Ultra-Stable Voltage Reference Hybrid Devices // White Paper.
5. Precision DC References and System Accuracy. Application note. October, 2012.
6. VRE305: Precision Voltage Reference. Datasheet. September, 2012.