

Билл Лаумайстер, Дэвид Фрай (Maxim Integrated)

# ОСОБЕННОСТИ ТОПОЛОГИИ И ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКОВ ОПОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В статье рассматриваются наиболее распространенные топологии источников опорного напряжения (ИОН): трехвыводные ИОН типа «Bandgar» и ИОН на стабилитронах со скрытой структурой, а так же двухвыводные параллельные ИОН на стабилитронах. Кроме того, в статье раскрывается суть основных параметров источников опорного напряжения.

При выборе ИОН, в первую очередь, рассматривают такие характеристики, как номинальное выходное напряжение и его начальная точность установки, при этом забывая о множестве других параметров, которые могут иметь большую важность в определенных приложениях. Кроме того, рассматривая суммарную погрешность при проектировании схем с преобразователями сигналов (ЦАП, АЦП), необходимо учитывать и погрешности ИОН [1].

Дальнейшее рассмотрение базовых основ ИОН поможет лучше понять особенности различных типов ИОН и их основных параметров, соответствующих наиболее распространенным топологиям: двухвыводным параллельным (шунтовым) и трехвыводным последовательным [2,3].

## Разновидности ИОН

Существует три широко распространенных технологии реализации ИОН: на транзисторах с плавающими затворами, на стабилитронах, ИОН на напряжении запрещенной зоны (технология «Bandgar»). ИОН на транзисторах с плавающими затворами имеют ограниченное применение (исключительно в защищенных устройствах) из-за своей высокой чувствительности к радиационному излучению. Альфа, бета, гамма, космическое излучение или рентгеновские лучи в аэропортах, больницах, на транспорте разряжают емкости затворов.

Второй тип ИОН основан на использовании стабилитронов. Стабилитроны с лавинным типом пробоя могут стабилизировать напряжение выше 5,5 В (крутой участок ВАХ), величина стабилизируемого напряжения зависит от технологического процесса производства полупроводника. Стабилитроны с туннельным пробоем позволяют по-

лучать меньшие напряжения стабилизации. Основным источником шумов в стабилитронах являются неоднородности и дефекты у поверхности кристалла, в ИОН на основе стабилитронов со скрытой структурой эта проблема решается помещением стабилитрона вглубь кристалла или под его поверхность.

Наиболее распространенным типом ИОН является «Bandgar». В них используется пара транзисторов с различными плотностями токов и, соответственно, различными температурными коэффициентами. Напряжения с противоположными по знаку температурными коэффициентами, вычитаясь друг из друга, дают практически плоскую температурную зависимость [4].

Последовательные и параллельные ИОН могут использовать любую из описанных технологий. В приложении приводится сравнение последовательных и параллельных ИОН с различными технологиями.

## Двухвыводные параллельные ИОН

Как следует из названия, параллельный ИОН включается параллельно нагрузке (рисунок 1). Он может рассматриваться как источник тока, контролируемый выходным напряжением. На холостом ходу вытекающий ток создает на резисторе R1 желаемое напряжение ( $V_{IN} - I_{REF} * R1 = V_{REF}$ ). Если, к примеру,  $V_{IN} = 6,0$  В, а желаемое напряжение  $V_{REF}$  равно 5,0 В, то ток  $I_{REF}$  создает на R1 падение 1 В. ИОН подстраивает  $I_{REF}$  таким образом, чтобы на выходе оставалось 5,0 В.

Подключим нагрузку к выходу ИОН. Теперь  $I_{REF}$  больше не равен  $I_{R1}$ , потому что ток нагрузки ( $I_L$ ) создает дополнительное падение напряжения на R1. ИОН автоматически уменьшает  $I_{REF}$  на величину  $I_L$ . В итоге суммарный ток, протекающий через R1, не меняется (то

есть сумма  $I_{REF} + I_L$  равна исходной величине  $I_{R1}$ ). Ток  $I_{R1}$  разделяется и течет параллельно как в нагрузке, так и в ИОН, отсюда и название «параллельный ИОН». Такой ИОН стабилизирует выходное напряжение, подстраивая ток  $I_{REF}$  противоположно изменению тока нагрузки  $I_L$ .

## Трехвыводные последовательные ИОН

Последовательный ИОН (рисунок 2), может рассматриваться как переменный резистор, управляемый напряжением. Выходное напряжение  $V_{OUT}$  контролирует внутреннее сопротивление между входом и выходом ИОН. Ток, протекающий через внутреннее контролируемое сопротивление, создает падение напряжения между входом и выходом ИОН. Без нагрузки через внутреннее сопротивление (R), протекает малый ток ( $I_Q$ ), обеспечивая падение напряжения между входом и выходом, необходимое для обеспечения требуемого  $V_{OUT}$ .

При увеличении тока нагрузки ИОН поддерживает требуемое выходное напряжение, изменяя R для обеспечения корректного падения напряжения между входом и выходом. В соответствии с законом Ома, для поддержания постоянного напряжения между входом и вы-

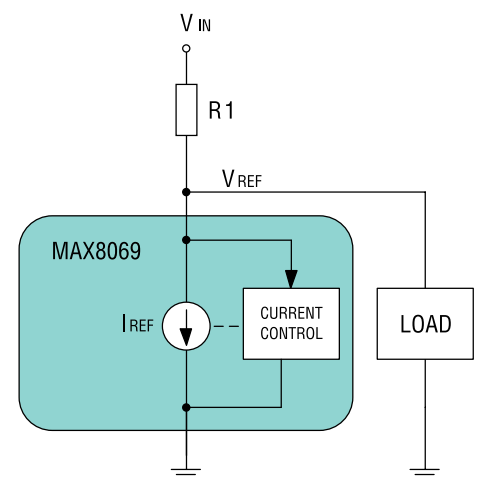


Рис. 1. Параллельный ИОН подключается параллельно нагрузке

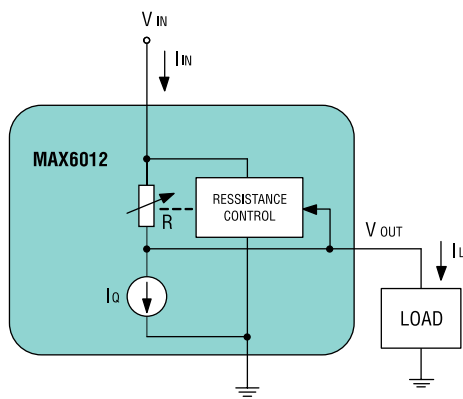


Рис. 2. Регулирующая часть последовательного ИОН подключена последовательно с нагрузкой

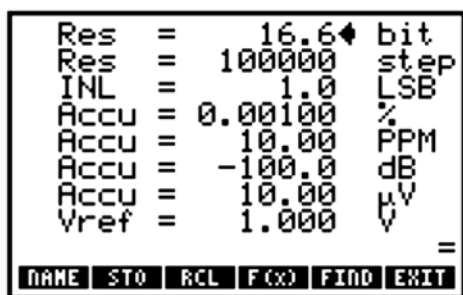


Рис. 3. Точность в процентах полной шкалы (%), ppm, дБ, В и мкВ

ходом  $R$  должно уменьшаться при увеличении  $I_{OUT}$ .

### Единицы измерения для параметров ИОН

Единицы измерения таких параметров, как, например, точность, могут отличаться у разных производителей. Наиболее часто для определения точности используются: проценты от полной шкалы (%), миллионная доля (ppm), децибелы (дБ), напряжение (В или мкВ). Каждая из этих единиц допустима, но для корректного сравнения параметров необходимо уметь переводить одни единицы в другие [5].

Калькулятор погрешностей (рисунок 3) может помочь в разработке и анализе цепей с ИОН и преобразователями сигналов. Он вычисляет постоянную составляющую погрешности идеального преобразователя, использующего как ЦАП, так и АЦП. Постоянная составляющая погрешности преобразователя определяется как максимальное отклонение от идеальной передаточной функции. Хотя HP® 50g и удобный инструмент, существует еще и бесплатный эмулятор, который может использоваться на компьютерах с ОС Windows®. Для дополнительной информации о калькуляторе погрешностей, в

том числе — о бесплатном эмуляторе, см. Steve’s Analog Design Calculators.

### Точность в процентах от полной шкалы

Наиболее часто точность определяется в процентах от номинального значения. По сути, проценты не являются единицей измерения. Это условная величина для определения точности, например, резисторов, конденсаторов и индуктивностей. Типовые значения погрешностей ИОН 1%, 1,5%, 2%, 5%, и т.д. Хотя измерение погрешностей в процентах удобно для сравнения ИОН, это не дает необходимой информации о колебаниях напряжений, и наибольшее значение имеет знание величины колебаний, выраженное в вольтах.

Если известна погрешность в процентах, то для определения отклонения напряжения, выраженного в вольтах, необходимо умножить номинальное выходное напряжение на погрешность в процентах и разделить на 100. К примеру, при номинальном напряжении 2,5 В и погрешности 1,5% имеем отклонение:  $\pm(2,5 \text{ В} \times 1,5)/100 = \pm 0,0375 \text{ В}$ , или  $\pm 37,5 \text{ мВ}$ .

Так как ошибка может быть как положительной, так и отрицательной, то суммарное отклонение будет в два раза

Таблица 1. Преимущества и недостатки ИОН на стабилизаторах

Преимущества	Недостатки
Внешний резистор и выходной конденсатор фильтруют помехи по питанию	Рабочий ток изменяется при изменении напряжения питания
Низкое напряжение питания	Большая рассеиваемая мощность
Миниатюрный корпус	Требует осторожного выбора ограничительного резистора основанного на требованиях питания и величины нагрузки
Стабилен в широком диапазоне емкостной нагрузки	Внешний резистор требует дополнительного пространства на плате
Может быть использован как ограничитель напряжения	Требует точного и стабильного питающего напряжения для поддержания выходной точности
Может использоваться при любом питающем напряжении	Низкая эффективность
Низкая стоимость	Низкая начальная точность (зависит от конкретного типа)
	Низкая температурная стабильность

Таблица 2. Преимущества и недостатки ИОН на стабилизаторах со скрытой структурой

Преимущества	Недостатки
Уменьшает шум (исключено влияние поверхности кристалла)	Требует питающего напряжения свыше 5 В
Низкая температурная нестабильность в сравнении с «Bandgap» и ИОН на стабилизаторах	Большая потребляемая мощность
Низкий временной дрейф	Дороговизна
Высокая точность	

Таблица 3. Преимущества и недостатки «Bandgap»-ИОН

Преимущества	Недостатки
Низкая потребляемая мощность	Средние шумовые характеристики
Достаточная начальная точность, которая может быть улучшена подстройкой	Средняя температурная нестабильность
Обеспечение стабильного напряжения вплоть до 1 В (идеально для портативных приборов)	Большой корпус

больше — 75 мВ.  $2,5 \text{ В} \pm 0,0375 \text{ В} = 2,4625...2,5375 \text{ В}$

Зная допустимые пределы отклонения напряжения, можно выбрать соответствующий ИОН.

### Точность, измеряемая в ppm

Другая единица измерения точности — миллионная доля (parts per million, ppm). Она, как правило, используется для характеристики температурных коэффициентов и других параметров, изменение которых под действием различных факторов невелико. Для 2,5 В, 1 ppm — это одна миллионная от 2,5 В, то есть 2,5 мкВ. Если ИОН имеет точность 10 ppm (что весьма неплохо для любого ИОН), его выходная точность составит:  $2,55 \text{ В} \times 10/10^6 = 25 \text{ мкВ}$ .

Отклонение напряжения при этом  $2,5 \text{ В} \pm 25 \text{ мкВ} = 2,499975...2,500025 \text{ В}$ .

Преобразуя в проценты, получаем:  $\pm(25 \times 10^{-6} \text{ В}) \times 100/2,5 \text{ В} = \pm 0,001\%$ .

### Точность в битах

Использование термина «бит» в качестве единицы измерения точности, например, «16-битный ИОН», неоднозначно. Выражает ли это измеряемую точность, или значит, что этот ИОН достаточно точен для использования совместно с 16-битным АЦП? 16-битный ИОН должен быть точен с погрешностью 1 LSB или 2 LSB соответственно, он не обязательно подходит для 16-битной системы.

Если единица измерения характеризует непосредственные измерения, то «16-битная точность» это всего лишь значение параметра, деленное на заявленное разрешение в битах, выраженное в десятичном виде. Например, номинальное напряжение 2,5 В для ИОН с заявленной 16-битной точностью (еще один пример отличной точности для любого ИОН), должно быть разделено на десятичное значение 16 бит:  $2^{16} = 65536$ . Поэтому 1 бит — это  $1/65536$  часть от номинального значения. Тогда  $2,5/65536 \approx 38 \text{ мкВ}$ . Если мы примем точность в 1 бит ( $\pm 1 \text{ LSB}$ ), выходное отклонение может быть на 1 бит больше или меньше номинального значения, то есть  $\pm 38 \text{ мкВ}$ .

Отклонение напряжения при этом  $2,5 \text{ В} \pm 38 \text{ мкВ} = 2,499962...2,500038 \text{ В}$ .

Преобразуя в проценты, получаем:  $(\pm 38 \times 10^{-6} \text{ В}/2,5 \text{ В}) \times 100 = \pm 0,0015\%$ .

### Основные типовые параметры ИОН

Параметр «начальная точность» говорит сам за себя. Можно взять произвольно выбранный компонент из партии, установить в тестовую схему контрольно-проверочной аппаратуры и измерить выходное напряжение. Измеренное значение должно находиться в диапазоне заданной начальной точности, определенной в документации.

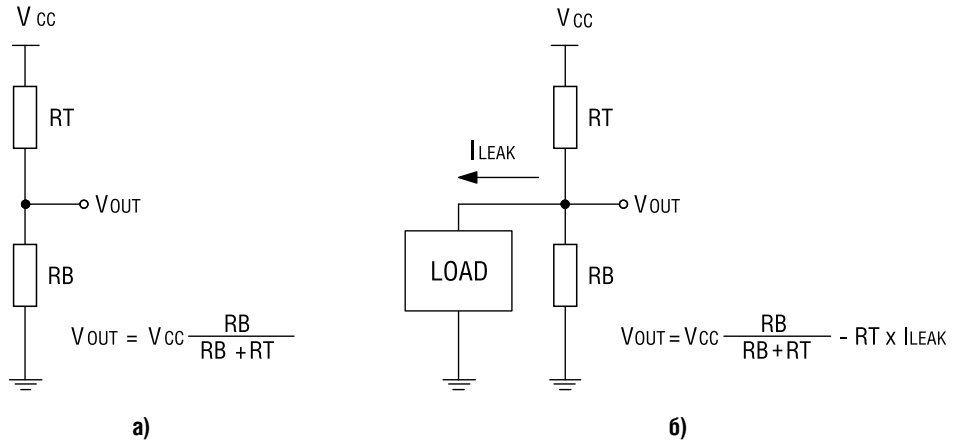


Рис. 4. Аналогия ИОН и резистивного делителя без нагрузки (а) и с нагрузкой (б)

Данная характеристика, как правило, приводится для комнатной температуры, для конкретного значения входного напряжения и выходного тока. Этот параметр является отправной точкой для большинства других параметров. Начальная точность зависит от температурных перегрузок корпуса, поэтому необходимо следовать правильному температурному режиму при пайке, а деформация печатной платы должна быть сведена к минимуму. Температурные перегрузки способны вызывать изменения начальной точности, эти изменения характеризуются температурным гистерезисом и долговременной нестабильностью (временной дрейф). По этой причине в промышленности и, особенно, в военной отрасли требуются новые компоненты с кодом даты, не превышающим несколько лет.

**Температурный коэффициент напряжения (ТКН)** характеризует изменение выходного напряжения при изменении температуры окружающей среды или температуры корпуса. В зависимости от структуры ИОН и способа подстройки выходного напряжения в процессе начальной калибровки, изменение напряжения от температуры может иметь как положительный знак (напряжение увеличивается при увеличении температуры), так и отрицательный (напряжение уменьшается с ростом температуры). Зависимость от температуры практически никогда не линейна. Например, увеличение температуры от 25 до 30°C не приведет к тому же изменению выходного напряжения, как при изменении температуры от 65 до 70°C, хотя рост температуры такой же [6].

Для аналогии рассмотрим простейший резистивный делитель без нагрузки (рисунок 4а). Напряжение в общей точке ( $V_{OUT}$ ) является частью приложенного напряжения ( $V_{IN}$ ), пропорциональному отношению номиналов резисторов. Оба резистора меняются с изменением температуры одинаково, поддерживая отношение номиналов постоянным, а значит,  $V_{OUT}$  также не меняется.

Легко заметить, что ток, протекающий через резисторы, меняется с изменением температуры, и ток нагрузки (вытекающий или втекающий) меняет  $V_{OUT}$  (рисунок 4б). При комнатной температуре это изменение может быть скомпенсировано подстройкой одного из резисторов (изменением значения его сопротивления). Однако, если ток нагрузки зависит от температуры не так, как ток, протекающий в делителе, то значение  $V_{OUT}$  будет зависеть от температуры. Это изменение  $V_{OUT}$  от температуры называется температурным коэффициентом (ТКН). Хотя эта аналогия весьма упрощенно показывает сложные процессы, происходящие в ИОН, тем не менее, она передает идею температурного коэффициента.

**Температурный гистерезис** — это изменение выходного напряжения при циклических изменениях температуры. Для измерения этого параметра необходимо взять типовую схему с ИОН, предназначенную для работы, например, в расширенном температурном диапазоне -40...85°C. Далее измерить выходное напряжение при комнатной температуре (25°C). Понизить температуру до -40°C, затем поднять ее до 85°C, после чего опять установить температуру 25°C. Вновь измерить выходное напряжение. Разность в полученных измерениях, если она присутствует, и есть температурный гистерезис. Стоит отметить, что также допустимо сначала разогреть систему до 85°C, потом охладить до -40°C и вновь поднять температуру до 25°C. Изменение выходного напряжения при этом сменит знак. Можно заметить, что после ряда последовательных температурных циклов величина выходного напряжения становится другой. Это является следствием того факта, что температурный гистерезис при разогреве и охлаждении имеет разные знаки, и результирующие изменения выходного напряжения при последовательных температурных циклах компенсируют друг друга, в итоге среднее выходное напряжение стремится к номинальному зна-

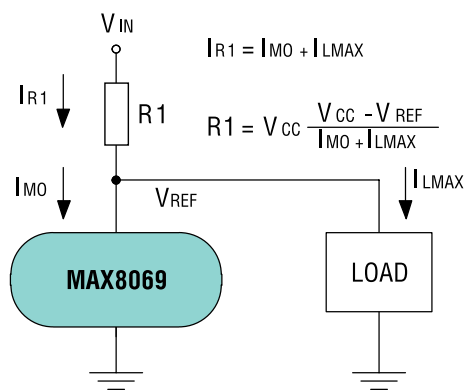


Рис. 5. Протекающий ток необходим для анализа рабочего режима параллельного ИОН

чению. Данный параметр связан с напряжением кристалла. Температурные циклы сглаживают эти напряжения. Обычно после пяти циклов напряжение кристалла уменьшается до минимума. Однако, напряжения в кристалле могут возникнуть вновь, например, в процессе пайки или при деформации корпуса.

**Коэффициент стабилизации по входному напряжению** характеризует изменение выходного напряжения при изменении входного. Этот параметр

особенно важен при изменениях входного напряжения во время использования ИОН, например в приложениях с батарейным питанием. Измеряется он в ppm/V или в %/V. Коэффициент стабилизации по входному напряжению — это статический параметр, который определяется для режима постоянных токов. Он измеряется по разности значений выходных напряжений для двух (или более) различных значений постоянного входного напряжения, при этом не имеет значения, как быстро менялось входное напряжение. В общем случае, коэффициент стабилизации ухудшается обратно частоте изменения входного напряжения. Для приложений, в которых возможны переходные процессы, на входе ИОН рекомендуют помещать конденсатор для уменьшения скачков напряжения.

**Коэффициент стабилизации по току нагрузки** характеризует изменение выходного напряжения при изменении выходного тока. Этот параметр важен, когда нагрузочный ток меняется в процессе работы, например, когда нагрузкой ИОН является ЦАП R-2R типа. Значение входного сопротивле-

ния значительно изменяется с изменением кода ЦАП. Коэффициент стабилизации по току — также статический параметр, определяемый для режима постоянных токов. Он характеризуется изменением выходного напряжения для двух (или более) значений выходного тока и не зависит от скорости его изменения. В общем случае коэффициент стабилизации по току ухудшается обратно пропорционально частоте изменения входного напряжения. Рекомендуется использовать выходной конденсатор для сглаживания выходного напряжения в приложениях с изменяющимся выходным током. Единицами измерения являются ppm/mA, %/mA, возможно использование отношения выходного напряжения при работе на холостом ходу и при максимальной нагрузке, выраженное в процентах.

**Долговременная нестабильность (временной дрейф)** является важным параметром, если точность ИОН должна сохраняться при длительной работе (дни, недели, месяцы). Этот параметр выражает изменение выходного напряжения с течением времени при определенных условиях для стационарного

Таблица 4. ИОН производства Maxim Integrated

Наименование	Начальная точность макс, ± %	Шум (0,1...10 Гц), мкВП-П	Температурный коэффициент, ppm/°C, макс	Ток потребления макс, мкА	Особенности
<u>DS4303</u>	0,03	200	30	1,6	Подстраиваемый
<u>LM4040</u>	0,1	35	50	60	АЕС-Q100 параллельный
<u>LM4041</u>	0,1	20	100	65	Параллельный
<u>LM4050</u>	0,1	35	50	60	АЕС-Q100 параллельный
<u>MAX6006</u>	0,2	60	30	1	Параллельный
<u>MAX6012</u>	0,3	12	20	35	—
<u>MAX6018</u>	0,2	36	60	5	—
<u>MAX6023</u>	0,2	25	30	35	—
<u>MAX6029</u>	0,15	80	30	5	—
<u>MAX6033</u>	0,04	16	7	75	—
<u>MAX6034</u>	0,2	45	30	115	—
<u>MAX6035</u>	0,2	21	25	95	—
<u>MAX6037</u>	0,2	6	25	275	Регулируемый
<u>MAX6043</u>	0,05	4	15	490	—
<u>MAX6061</u>	0,4	13	20	125	—
<u>MAX6070</u>	0,04	6	7	150	Вход разрешения
<u>MAX6100</u>	0,4	18	75	150	—
<u>MAX6101</u>	0,4	13	75	150	—
<u>MAX6125</u>	1	15	50	100	Регулируемый
<u>MAX6126</u>	0,02	1,45	3	550	Подстраиваемый
<u>MAX6129</u>	0,4	30	40	5	—
<u>MAX6133</u>	0,04	16	3	80	—
<u>MAX6138</u>	0,1	35	25	65	Параллельный
<u>MAX6143</u>	0,1	4	3	490	Подстраиваемый, датчик температуры
<u>MAX6160</u>	1	15	100	100	Регулируемый
<u>MAX6173</u>	0,06	3,8	3	450	Подстраиваемый, датчик температуры
<u>MAX6190</u>	0,1	40	5	35	—
<u>MAX6220</u>	0,1	1,5	20	3,3	Подстраиваемый
<u>MAX6225</u>	0,04	1,5	2	2,7	Подстраиваемый
<u>MAX6325</u>	0,02	2,5	1	2,9	Подстраиваемый

режима работы. Долговременная нестабильность определяет минимальное и максимальное изменение напряжения в течение длительного периода времени, а не изменение показаний между временными точками «А» и «Б». Остальные факторы (например, температура, входное напряжение, выходной ток) должны сохранять свои значения для того, чтобы напряжение попадало в заявленный диапазон. Обычно единицы измерения этого параметра — ppm на 1000 часов работы.

**Ток потребления** является очевидным параметром, но рассмотрим различные варианты.

Для последовательных ИОН термин «ток холостого хода» определяется в документации и часто взаимозаменяем с термином «ток потребления» ( $I_Q$ ). Это связано с тем, что фактический потребляемый ток ИОН и есть ток холостого хода, при наличии нагрузки через ИОН течет еще и нагрузочный ток.

Для обычных параллельных ИОН в документации не определен ток холостого хода. Вместо этого используется термин «минимальный рабочий ток» ( $I_{MO}$ ). Этот параметр характеризует минимальный ток, необходимый ИОН для обеспечения постоянства выходного напряжения. Стоит помнить, что параллельный ИОН при максимально допустимом токе нагрузки должен потреблять ток, как минимум, равный минимальному рабочему току. В этом случае ток, протекающий через последовательный резистор ( $R1$ ), равен сумме максимального тока нагрузки и минимального рабочего тока (рисунок 5). Для ряда приложений минимальный рабочий ток (который может называться «ток регулирования») считают несущественным относительно тока нагрузки, и не учитывают в расчетах.

**Ток через вывод земли** характеризует последовательные ИОН. Он определяет рабочий ток при заданной нагрузке. Ток, втекающий через вход последовательного ИОН, является суммой тока нагрузки и рабочего тока. Ток через вывод земли характеризует значения тока потребления при наличии нагрузки.

**Собственное падение напряжения** ( $V_{DO}$ ) является очень важным параметром для низковольтных приложений и приложений с батарейным питанием. Параметр применим только к последовательным ИОН (он так же важен, как и  $I_{MO}$ ). Минимальное падение напряжения между входом и выходом позволяет ИОН поддерживать заявленную точность ( $V_{OUT} + V_{DO}$  = минимальное входное напряжение). Так как напряжение батареи падает при разряде, то для увеличения времени ее использования ИОН должен поддерживать величину выходного напряжения при как можно более низком напряжении батареи.

Поэтому меньшее значение собственно падения напряжения позволяет работать даже при пониженных уровнях заряда. Пристальное внимание следует уделять току, для которого указано значение  $V_{DO}$ : при малых токах величина  $V_{DO}$  имеет малое значение. Это аналогично протеканию малых токов через «rail-to-rail»-выход.

**Допустимая емкость нагрузки** является очень важным параметром и характеризует способность ИОН к перезаряду емкости нагрузки. Это связано с тем, что обычный ИОН включает в себя цепи обратной связи, их устойчивость может быть нарушена емкостной нагрузкой, которая, вызывая большой фазовый сдвиг в контролирующей цепи, приводит к возникновению положительной обратной связи на конкретной частоте. Следует внимательно ознакомиться с документацией, описывающей диапазон разрешенной емкостной нагрузки. Некоторые производители указывают этот параметр только в тексте документации, не вынося его в таблицу с основными параметрами.

**Шум** всегда присутствует на выходе ИОН, однако зачастую им пренебрегают. Он представляет собой производный сигнал, который генерируется внутренними пассивными и активными элементами интегральной схемы и значительно влияет на точность. Например, при шуме в 1 мВ р-р точность выходного напряжения ограничена 1 мВ на постоянном токе. Для 1,2 В ИОН такой шум добавит к начальной погрешности 0,1%.

В документации, как правило, указывают величину шумов для двух частотных диапазонов: низкочастотный шум, 0,1...10 Гц, измеряемый в мкВП-П, и широкополосный шум, 10 Гц...1 кГц, измеряемый в мкВ ср.кв. Разделение на частотные диапазоны позволяет разработчику отличать широкополосный шум, который может быть отфильтрован при помощи конденсаторов с адекватными номиналами, от низкочастотного, который отфильтровать нельзя. При этом, даже если величина выходного конденсатора будет достаточна для фильтрации низкочастотного шума, этот конденсатор может привести к самовозбуждению ИОН. Существует программный калькулятор, помогающий рассчитывать величины шумов [7].

**Коэффициент передачи по переменному току**, как правило, не помещают в табличные данные, но он, тем не менее, влияет на производительность ИОН. В большинстве приложений питающее напряжение ИОН имеет выбросы. Эти выбросы покрывают широкий частотный диапазон. Точность ИОН обратно пропорциональна частоте изменения входного напряжения. В документации эта зависимость от частоты, как

правило, отображается в виде графика. Данный график показывает чувствительность ИОН ко входным шумам и используется для определения требований ко входному фильтру. При увеличении частоты выходного шума фильтр должен уменьшать уровень входных помех, чтобы ИОН достиг необходимой точности.

**Коэффициент подавления помех с шины питания (PSRR)** иногда указывают в документации. PSRR; как правило, его измеряют в дБ. Он характеризует, насколько сильно подавляется шум выходного сигнала относительно входного ( $PSRR = \Delta V_{CC} / \Delta V_{OUT}$ ).

**Полное выходное сопротивление** является еще одним параметром, который может отсутствовать в таблице. Этот параметр важен, если ток нагрузки постоянно изменяется. Обычно точность ИОН при этом обратно пропорциональна частоте изменения тока. График зависимости полного выходного сопротивления от частоты, как правило, приводится в документации. Этот график показывает, какой выходной фильтр необходим при заданной величине изменений нагрузки для достижения требуемой точности.

**Переходная характеристика** обычно представляется в виде снимка осциллограммы, на которой изображены ступенчатое изменение входного напряжения и соответствующая реакция выходного напряжения. Этот снимок показывает время восстановления до требуемой точности после такого воздействия. Стоит помнить, что данная осциллограмма приводится для конкретных значений входных и выходных емкостей. Эти емкости имеют большое влияние на данную характеристику.

**Нагрузочная переходная характеристика (время установления выходного напряжения)** обычно представляется в виде снимка осциллограммы, на которой изображены ступенчатое изменение выходного тока и соответствующая реакция выходного напряжения. Этот снимок отражает время восстановления заявленной точности выходного напряжения при заданном воздействии. Стоит помнить, что данная осциллограмма приводится для конкретных значений входных и выходных емкостей. Эти емкости оказывают сильное влияние на данную характеристику.

**Время установления после включения/выключения** характеризует время стабилизации выходного напряжения при подаче напряжения питания. При этом имеется в виду только стабилизация выходного напряжения, которое не обязательно достигает точного номинального значения. Обычно этот параметр устанавливается для большей погрешности выходного напряжения, чем заявленная, что необходимо

учитывать. Значение этого параметра сильно зависит от параметров входных и выходных емкостей. Кроме того, ИОН не должен выходить за рамки допустимых значений токов при заряде выходных емкостей. **Время выключения** характеризуется уменьшением выходного напряжения до значений, близких к нулевым, при выключении питания. Этот параметр также сильно зависит от величины входных и выходных емкостей.

**Выходной ток короткого замыкания** характеризует функцию защиты от замыкания на землю или вход ИОН. Выражает величину выходного тока при замыкании выхода на GND или IN. Обычно это аварийное состояние, в которое ИОН входит под действием нагревания. В разделе предельно допустимых значений указывают время, в течение которого ИОН может находиться в данном режиме.

### Двухвыводной параллельный ИОН (на основе стабилитронов)

ИОН на стабилитронах применим для напряжений более 5 В. В стабилитроне ток при обратном смещении вначале слабо зависит от напряжения, а потом лавинообразно нарастает при росте напряжения. Последовательный резистор ограничивает рост тока, позволяя стабилизировать обратное напряжение.

Стабилитрон ведет себя как обычный шунт или как двухвыводной ИОН. Он также может использоваться как ограничитель напряжения.

### Двух и трехвыводные последовательные «Bandgap»-ИОН

Для устройств с напряжениями ниже 5 В необходим компромисс между стоимостью и высоким уровнем разрешения (низкие уровни шумов и высокая точность), поэтому «Bandgap» стали наиболее востребованным типом ИОН. Они компенсируют температурную нестабильность благодаря отрицательному температурному коэффициенту прямо смещенного база-эмиттерного перехода и положительному температурному коэффициенту выходного напряжения, которое пропорционально температуре. Такое напряжение получается усилением напряжения между двумя прямо смещенными p-n переходами.

### Заключение

Зачастую выбор ИОН делается в спешке. Перед принятием решения разработчик зачастую обращает внимание только на цену и заявленную начальную точность, выделенную в документации. Сравнение различных источников опорного напряжения должно быть адекватным, а сравниваемые параметры — измеряться в одних единицах. Необходимо

определять, какие из параметров наиболее важны для вашего конкретного случая, нельзя ограничиваться только начальной точностью.

### Литература

1. Application note 4300, "Calculating the Error Budget in Precision Digital-to-Analog Converter (DAC) Applications." Maxim Integrated.
2. Application note 4003, "Series or Shunt Voltage Reference?". Maxim Integrated.
3. Application note 2879, "Selecting the Optimum Voltage Reference. Maxim Integrated.
4. Application Note 5062, "«Bandgap» Reference Calculator Tutorial." . Maxim Integrated.
5. «Steve's Analog Design Calculators» (<http://www.maximintegrated.com/design/tools/calculators/hp50g/>)
6. Application Note 4419, "Understanding Voltage-Reference Temperature Drift." . Maxim Integrated.
7. Application note 5059, "Thermal Noise Calculator Tutorial. Maxim Integrated."

Получение технической информации, заказ образцов, поставка – e-mail: [analog.vesti@compel.ru](mailto:analog.vesti@compel.ru)



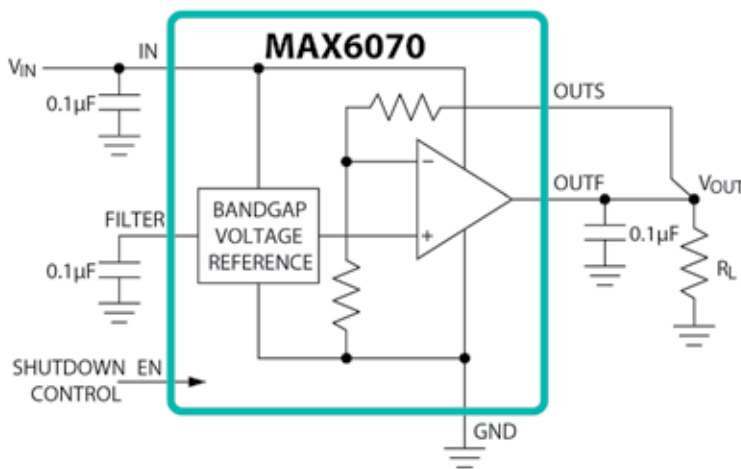
## Семейство ИОН MAX6070, MAX6071



Отличная температурная и долговременная стабильность метрологических характеристик в корпусе SOT23

### Преимущества

- Низкое значение температурного дрейфа: 6 ppm/°C (max)
- Высокая долговременная стабильность: 35 ppm/1,000 часов
- Высокая начальная точность: 0,04%
- Низкое значение шума: 4,8 мкВРР
- Встроенный фильтр (MAX6070)
- Компактный корпус SOT23



Логотип Maxim Integrated – торговая марка Maxim Integrated Products, Inc.

Москва  
Тел.: (495) 234-7764, доб. 2328  
Соколов Андрей  
E-mail: [a.sokolov@compel.ru](mailto:a.sokolov@compel.ru)

Санкт-Петербург  
Тел.: (812) 327-9403, доб. 4219  
Червинский Михаил  
E-mail: [cmv.spb@compel.ru](mailto:cmv.spb@compel.ru)

Компэл  
[www.compel.ru](http://www.compel.ru)