

# Интегральные источники опорного напряжения

**Первыми полупроводниковыми источниками опорного напряжения (ИОН) были стабилитроны, для которых характерны большой разброс напряжения стабилизации от образца к образцу, значительный температурный дрейф, довольно большое динамическое сопротивление, особенно при малых токах стабилизации. Даже прецизионные стабилитроны, предназначенные для применения в измерительной технике, не лишены многих из этих недостатков и обеспечивают заявленные характеристики только при поддержании стабильного тока через стабилитрон, в большинстве случаев довольно значительного — до 10 мА.**

Михаил ПУШКАРЕВ  
pmm@midaus.com

С появлением интегральных ИОН ситуация коренным образом изменилась. Особо следует отметить, что отличные характеристики обеспечиваются при низких значениях выходного напряжения, что дает интегральным ИОН абсолютное преимущество в современной аппаратуре, имеющей, как правило, низкие напряжения питания. По схемотехническому построению распространенные ИОН делятся на три группы: на стабилитронах, на ширине запрещенной зоны и на ХФЕТ-ячейке. Подробнее о вариантах исполнения ИОН можно узнать из специальной литературы [1, 2].

По способу включения в схему ИОН делятся на две группы: параллельные и последовательные.

## Параллельные ИОН

Схема включения двухвыводного параллельного ИОН аналогична схеме включения стабилитрона. Наряду с двухвыводными имеется ряд микросхем так называемых «регулируемых стабилитронов», в том числе и популярнейшая разработка Texas Instruments — TL431. Наличие вывода регулировки позволяет с помощью двух резисторов получить ИОН с произвольным напряжением стабилизации в диапазоне напряжений от опорного до максимально допустимого рабочего напряжения микросхемы. В некоторых трехвыводных параллельных ИОН, таких как ADR512, LT1009, третий вывод предназначен для подстройки выходного напряжения в пределах от долей процента до единиц процентов.

Опорное напряжение в микросхеме TL431 и ее многочисленных версиях измеряется между выводом Ref и анодом, а в микросхемах AMS3100, LM185(285, 385), LM4041, LM4051 — между выводом Ref и катодом.

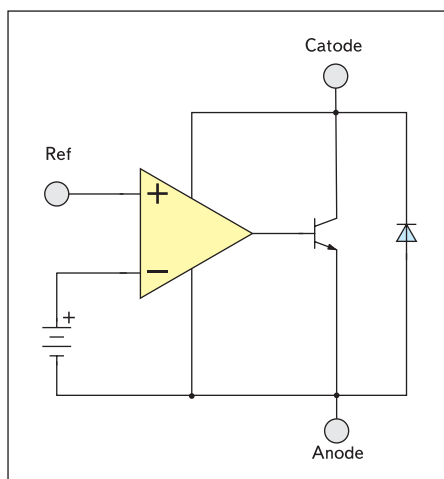


Рис. 1

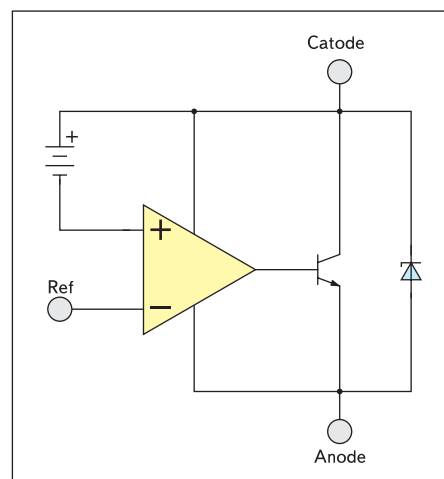


Рис. 2

Структурные схемы этих двух вариантов «регулируемых стабилитронов» показаны на рис. 1, 2 соответственно. Такое разнообразие дает разработчику дополнительные возможности при использовании трехвыводных ИОН в качестве элемента обратной связи.

Микросхема TL431 чаще всего используется в качестве элемента обратной связи, управляющего светодиодам оптрона в импульсных источниках питания, но ее использование затруднительно уже в источнике питания с выходным напряжением 5 В и менее. Это затруднение можно преодолеть с помощью микросхем LT1431 (Linear Technology), MIC4043 (Micrel), TS4431, TS4436 (STMicroelectronics), имеющих выход с открытым коллектором, и микросхемы NCP100 (ON Semiconductor) с минимальным напряжением стабилизации всего 0,9 В.

Параллельные ИОН перечислены в таблице 1, а их характеристики приведены в таблице 3.

## Последовательные ИОН

В таблице 2 перечислены микросхемы последовательных ИОН, а в таблице 4 приведены их характеристики.

Последовательные ИОН включаются аналогично последовательным стабилизаторам напряжения. Существенным отличием для большинства микросхем последовательных ИОН является работоспособность не только при вытекающем, но и при втекающем токе нагрузки, что очень важно при совместной работе с ЦАП на переключаемых конденсаторах и в некоторых других приложениях.

Последовательные ИОН существенно экономичнее параллельных при большой разнице между напряжением питания и выходным напряжением, что дает преимущества при их использовании в аппаратуре с батарейным питанием. Дополнительные возможности по снижению энергопотребления дает наличие в ИОН (ADR318, LT1461) вывода отключения.

Таблица 1. Параллельные ИОН

Выходное напряжение, В	Обозначение	Производитель	Выходное напряжение, В	Обозначение	Производитель
0,6	TS4436	STMicroelectronics	2,495–36	LM431	National Semiconductor
0,9–6	NCP100	ON Semiconductor		TL431	Calogic, Philips, STMicroelectronics, Texas Instruments
1	ADR510	Analog Devices		TL1431	STMicroelectronics
1,2	ADR512	Analog Devices		K1156EP5	СИТ
1,22	AMS5010	Advanted Monolithic Systems	2,5	ADR525, ADR5041	Analog Devices
	LM113, LM313	National Semiconductor		AMS05, AMS236, AMS336, AMS255, AMS1004-2.5, AMS1009, AMS3100-2.5, AMS3100A-2.5	Advanted Monolithic Systems
	MAX8069	Maxim		AS285-2.5, AS385-2.5	Альфа
1,2205	MAX6138_12	Maxim		LM185-2.5	National Semiconductor
1,224	TS4431	STMicroelectronics		LM285-2.5, LM385-2.5	National Semiconductor, ON Semiconductor, Texas Instruments
1,225	AD1580	Analog Devices		LT1004-2.5	Linear Technology, Texas Instruments
	AMS4041	Advanted Monolithic Systems		LT1009, LT1034, LT1389-2.5, LT1634-2.5	Linear Technology
	LT1034-1.2	Linear Technology		LM4040_25, REF1004-2.5	Texas Instruments
	LM4041-1.2	Maxim, Micrel, National Semiconductor		LM4040-2.5	Maxim, Micrel
	LM4041_12	Texas Instruments		LM4050-2.5	Maxim, National Semiconductor
	LM4051-1.2	Maxim, National Semiconductor		LM4431	National Semiconductor
	TS821, TS824-1.2, TS4041	STMicroelectronics		MAX6008, MAX6138_25	Maxim
1,225–10	LM4041	Texas Instruments	NCV1009	ON Semiconductor	
	LM4041-ADJ	Micrel, National Semiconductor	SPX385-2.5, SPX1004-2.5, SPX4040-2.5	Sipex	
	LM4051-ADJ	National Semiconductor	TS822, TS824-2.5, TS4040-2.5	STMicroelectronics	
1,23	ИС121	Сапфир	2,5–18	ИС251	Сапфир
1,235	AD589	Analog Devices		YP1101EH02	Кристалл
	AMS124, AMS285-1.2, AMS385-1.2, AMS1004-1.2, AMS3100-1.2, AMS9491	Advanted Monolithic Systems		SPX431LJ	Sipex
	LM185-1.2	National Semiconductor		2,5–20	SPX431L, SPX2431
	LM285-1.2, LM385-1.2	National Semiconductor, ON Semiconductor, Texas Instruments	ZNT431, ZR431, ZTL431		Zetex
	LT1004-1.2	Linear Technology	2,5–24	TS2431	STMicroelectronics
	REF1004-1.2	Texas Instruments		CL1431	Calogic
	SPX385-1.2, SPX1004-1.2	Sipex	2,5–36	LT1431	Linear Technology
1,24	AMS285, AMS385	Advanted Monolithic Systems		SPX431, SPX1431	Sipex
	SPX4041	Sipex		TL431	ON Semiconductor
1,24–5,3	LM185, LM285, LM385	National Semiconductor		TL1431	Texas Instruments
1,24–6	TLV431	Texas Instruments	MIK431	Микрон	
	TS431	STMicroelectronics	2,75–30	TL430	Texas Instruments
1,24–10	TS432	STMicroelectronics		3	ADR530, ADR5043
	ZR431L, ZTLV431	Zetex	LM4040_30		Texas Instruments
1,24–15	ZNT2431	Zetex	3,3	LM4040-3.0, LM4050-3.0, MAX6009, MAX6138_30	Maxim
1,24–16	TLV431	ON Semiconductor		LM4040-3.3, LM4050-3.3	Maxim
1,24–18	TLVH431, TLVH432	Texas Instruments	4,096	ADR540, ADR5044	Analog Devices
1,24–20	SC431	Semtech		LT1389-4.096, LT1634-4.096	Linear Technology
	SPX432	Sipex		LM4040_41	Texas Instruments
	K1156EP1	СИТ		LM4040-4.1	Maxim, Micrel
1,24–24	TS3431	STMicroelectronics		LM4050-4.1	Maxim, National Semiconductor
1,24–30	LMV431	National Semiconductor		MAX6138_41	Maxim
1,245	MIC4043	Micrel	5	ADR550, ADR5045	Analog Devices
1,25	AMS04	Advanted Monolithic Systems		LM136-5, LM236-5, LM336-5	National Semiconductor
	LT1389-1.25, LT1634-1.25	Linear Technology		LT1029, LT1389-5, LT1634-5	Linear Technology
	MAX6006	Maxim		LM4040_50	Texas Instruments
	REF1112	Texas Instruments		LM4040-5.0	Maxim, Micrel
1,25–5,3	AMS3100	Advanted Monolithic Systems		LM4050-5.0	Maxim, National Semiconductor
1,2875	ADR1500	Analog Devices		MAX6138_50	Maxim
	ADR520, ADR5040	Analog Devices	ИС501	Сапфир	
2,048	LM4040-2.1, LM4050-2.1, MAX6007, MAX6138_21	Maxim	6,9	LM329	National Semiconductor
	LM4040_20	Texas Instruments		6,95	LM199, LM299
	LM4050-2.0	National Semiconductor	LM399		Linear Technology, National Semiconductor
	LM136-2.5	National Semiconductor	7	LTZ1000CH	Linear Technology
LM236-2.5	National Semiconductor, Texas Instruments	8,192		LM4040_82	Texas Instruments
2,49	LM236, LM336		STMicroelectronics	LM4050-8.2	National Semiconductor
	LM336-2.5	Texas Instruments	LM4040_10	Texas Instruments	
			10	LM4050-10	National Semiconductor

Как и стабилизаторы напряжения, большинство последовательных ИОН с малым падением напряжения на регулирующем элементе, так называемые LDO, чувствительны к выбору выходного конденсатора.

Некоторые ИОН подключением соответствующих резисторов к выводу регулировки позволяют изменять выходное напряжение от опорного напряжения (LM4121-ADJ, MAX6160) почти до напряжения питания. Выходное напряжение ИОН X60250, DS4303, DS4305 сигналами на выводах программирования ус-

танавливается от нуля и почти до напряжения источника питания. Часть прецизионных ИОН (LT1236, MAX6143, REF02) имеет вывод подстройки для подключения потенциометра, который обеспечивает изменение выходного напряжения в небольших пределах.

Последовательные ИОН ADR121, LT1019, REF02 и некоторые другие имеют встроенный датчик температуры, сигнал с которого может использоваться для коррекции температурного дрейфа выходного напряжения.

### Выходное напряжение (напряжение стабилизации)

подавляющее большинство ИОН имеет выходное напряжение из ряда 1,2–1,25; 2,048; 2,5; 3; 3,3; 4,096; 5 В. Нижняя граница этого ряда близка к ширине запрещенной зоны кремния, другие значения получены соответствующим усилением.

Исключения представлены ADR510 с напряжением стабилизации 1 В, ADR130 с переключаемым выходным напряжением 0,5 или 1 В, ADR318 с выходным напряжением 1,8 В.

Таблица 2. Последовательные ИОН

Выходное напряжение, В	Обозначение	Производитель	Выходное напряжение, В	Обозначение	Производитель	
0–1,25	X60250	Intersil	2,5	REF2925, REF3025, REF3125, REF3225	Texas Instruments	
0,3...(VCC-0,3)	DS4303, DS4305	Maxim		SG1503, SG2503, SG3503	Microsemi	
0,5	ADR130	Analog Devices		VRE4125	Thaler	
1	ADR130	Analog Devices	3	AD780, AD1583, ADR02, ADR363, ADR423, ADR433, ADR443, REF193	Analog Devices	
1,024	ISL60002	Intersil		LM4120-3.0, LM4128-3.0, LM4132-3.0	National Semiconductor	
	LM4140-1.0	National Semiconductor		LT1460-3, LT1461-3, LT1790-3, LT6660-3, LTC1258-3, LTC1798-3	Linear Technology	
1,184–5	VRE4110	Thaler		MAX6003, MAX6023_30, MAX6029_30, MAX6030, MAX6033_30, MAX6034_30, MAX6035_30, MAX6037_30, MAX6063, MAX6103, MAX6126_30, MAX6129_30, MAX6133_30, MAX6163, MAX6193	Maxim	
1,2	MAX6037_ADJ	Maxim	REF2930, REF3030, REF3130, REF3230	Texas Instruments		
	ADR280	Analog Devices	ADR364, REF194	Analog Devices		
1,216–11,5	ISL60002	Intersil	ISL60002	Intersil		
	MAX6120, MAX6520	Maxim	LM4120-3.3, LM4128-3.3, LM4132-3.3	National Semiconductor		
1,23–12,4	LM4121-ADJ	National Semiconductor	LT1460-3.3, LT1461-3.3, LT1790-3.3, LT6660-3.3	Linear Technology		
1,247	MAX6160	Maxim	MAX6029_33, MAX6034_33, MAX6037_33, MAX6043_33, MAX6129_33, MAX6133_33, MAX6143_33, MAX6177	Maxim		
1,25	MAX6012	Maxim	REF2933, REF3033, REF3133, REF3233	Texas Instruments		
	MAX6061	Maxim	AD1584, ADR292, ADR365, ADR392, ADR434, ADR444, REF195	Analog Devices		
	ADR121	Analog Devices	LM4120-4.1, LM4125-4.1, LM4128-4.1, LM4132-4.1, LM4140-4.1	National Semiconductor		
	ISL60002	Intersil	LT1461-4.1, LT1790-4.096, LTC1258-4.1, LTC1798-4.1	Linear Technology		
	LM4121-1.2, LM4140-1.2	National Semiconductor	MAX6004, MAX6023_41, MAX6029_41, MAX6033_41, MAX6034_41, MAX6037_41, MAX6041, MAX6043_41, MAX6064, MAX6104, MAX6126_41, MAX6129_41, MAX6133_41, MAX6141, MAX6143_41, MAX6164, MAX6174, MAX6198, MAX6220_41, MAX6241, MAX6341	Maxim		
	LT1790-1.25	Linear Technology	MCP1541	Microchip		
1,263	MAX6018-12	Maxim	REF2940, REF3040, REF3140, REF3240	Texas Instruments		
1,6	MAX6018-16	Maxim	VRE4141	Thaler		
	ADR318	Analog Devices	X60003-41	Intersil		
1,8	ISL60002	Intersil	ADR435, REF196	Analog Devices		
	LM4120-1.8, LM4128-1.8, LM4132-1.8	National Semiconductor	LT1019	Linear Technology		
	MAX6018-18, MAX6068, MAX6100, MAX6168	Maxim	MAX6045, MAX6067, MAX6107, MAX6145, MAX6167, MAX6194	Maxim		
	ADR290, ADR360, ADR370, ADR380, ADR390, ADR420, ADR430, ADR440	Analog Devices	AD588, AD1585, ADR03, ADR127, ADR293, ADR366, ADR395, ADR425, ADR439, ADR445, REF198	Analog Devices		
2,048	ISL60002	Intersil	LM4120-5.0	National Semiconductor		
	LM4120-2.0, LM4125-2.0, LM4128-2.0, LM4132-2.0, LM4140-2.0	National Semiconductor	LT1019, LT1021-5, LT1027, LT1236-5, LT1460-5, LT1461-5, LT1790-5, LT6660-5, LTC1258-5, LTC1798-5	Linear Technology		
	LT1790-2.048	Linear Technology	MAX675, MAX875, MAX6005, MAX6023_50, MAX6029_50, MAX6033_50, MAX6035_50, MAX6043_50, MAX6050, MAX6065, MAX6105, MAX6126_50, MAX6129_50, MAX6133_50, MAX6143_50, MAX6150, MAX6165, MAX6175, MAX6220_50, MAX6250, MAX6350	Maxim		
	MAX6018-21, MAX6021, MAX6023_21, MAX6029_21, MAX6034_21, MAX6037_21, MAX6062, MAX6106, MAX6126_21, MAX6129_21, MAX6162, MAX6191	Maxim	REF02	Analog Devices, Maxim, Texas Instruments		
	REF191	Analog Devices	X60003-50	Intersil		
	REF2920, REF3020, REF3120, REF3220	Texas Instruments	LT1021-7	Linear Technology		
2,385–12	VRE4120	Thaler	7	AD581, AD587, AD588, AD688, ADR06	Analog Devices	
	LTC1258, LTC1798	Linear Technology		LT1019, LT1021-10, LT1031, LT1236-10, LT1460-10, LT6660-10	Linear Technology	
2,5	AD680, AD780, AD1582, ADR01, ADR125, ADR291, ADR361, ADR381, ADR391, ADR421, ADR431, ADR441, REF03, REF43, REF192	Analog Devices	10	MAX674, MAX6043_10, MAX6143_10, MAX6176, REF01	Maxim	
	ISL60002	Intersil		REF102	Texas Instruments	
	LM4120-2.5, LM4125-2.5, LM4128-2.5, LM4132-2.5, LM4140-2.5	National Semiconductor	AD588	Analog Devices		
	LT1019, LT1460-2.5, LT1461-2.5, LT1790-2.5, LT6660-2.5, LTC1258-2.5, LTC1798-2.5	Linear Technology	AD588, AD688	Analog Devices		
	MAX873, MAX6002, MAX6023_25, MAX6025, MAX6029_25, MAX6033_25, MAX6034_25, MAX6035_25, MAX6037_25, MAX6043_25, MAX6066, MAX6102, MAX6125, MAX6126_25, MAX6129_25, MAX6133_25, MAX6143_25, MAX6166, MAX6173, MAX6192, MAX6220_25, MAX6225, MAX6325	Maxim	–5	–10	AD588, AD688	Analog Devices
	MCP1403	ON Semiconductor				
	MCP1525	Microchip				

### Отклонение выходного напряжения от номинального значения

Это одна из важнейших характеристик ИОН, которая определяет необходимость калибровки и пределы регулировки в собранном устройстве. Если первые микросхемы имели отклонение выходного напряжения от номинального значения до  $\pm 4\%$  (TL431), то в последних разработках лазерной подгонкой значение этого параметра доведено до  $\pm 0,02\%$  (MAX6126). Как уже было показано ранее, некоторые из ИОН имеют вывод подстройки, к которому подключается потенциометр, позволяющий подстроить выходное напряжение к необходимому пользователю значению без ухудшения других характеристик.

### Температурный коэффициент выходного напряжения (температурный дрейф)

Не менее важной характеристикой ИОН, а для применения в высокоточной измерительной аппаратуре — зачастую и опреде-

ляющей, является зависимость выходного напряжения с изменением температуры окружающей среды. Обычным является измерение температурного коэффициента напряжения (ТКН) в  $\text{млн}^{-1}/^\circ\text{C}$ . Такой способ описания температурного дрейфа вполне корректен для стабилизаторов, у которых напряжение стабилизации изменяется практически линейно с изменением температуры. Для интегральных ИОН характерна существенно нелинейная зависимость выходного напряжения от температуры. Существует несколько методик измерения ТКН [3]. Для многих параллельных ИОН температурный дрейф нормируется в абсолютных единицах. 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, для MAX6035A максимальное значение ТКН составляет 20, 25 и 30  $\text{млн}^{-1}/^\circ\text{C}$

для температурных диапазонов  $0...+70^\circ\text{C}$ ,  $-40...+85^\circ\text{C}$  и  $-40...+125^\circ\text{C}$  соответственно.

В LM4132 температурный дрейф корректируется с использованием таблицы коэффициентов, записанных во встроенную EEPROM, чем достигнуто значение ТКН менее 20  $\text{млн}^{-1}/^\circ\text{C}$  в температурном диапазоне от  $-40$  до  $+125^\circ\text{C}$ .

### Температурный гистерезис

После нагрева или охлаждения ИОН и возвращения его к первоначальной температуре выходное напряжение возвращается к исходному значению с некоторой погрешностью, называемой температурным гистерезисом. Для прецизионных ИОН последних разработок эта характеристика обязательно приводится в справочных данных. Устранить влияние температурного гистерезиса в высокоточной аппаратуре можно термостатированием ИОН при температуре, заведомо большей максимально возможной температуры эксплуатации устройства, вплоть до термостатирования при транспортировке.







установлено, что временной дрейф выходного напряжения практически прекращается задолго до достижения 1000-часовой наработки [4]. Улучшить долговременную стабильность можно искусственным старением ИОН, предпочтительно в составе устройства, что позволит стабилизировать характеристики и других компонентов.

### Шумы

Шумовые характеристики ИОН нормируются в виде напряжения шумов от пика до пика в частотном диапазоне от 0,1 до 10 Гц, либо в виде среднеквадратичного напряжения шумов в частотном диапазоне от 10 Гц до 10 кГц. Для большинства качественных ИОН в справочных данных приводятся обе величины. Для уменьшения уровня шумов некоторые последовательные ИОН (MAX6126) имеют специальный вывод для подключения корректирующей емкости.

### Ток потребления

Большое собственное энергопотребление характерно для ИОН на стабилитронах, особенно для микросхем первых разработок (до 12 мА для AD688). Минимальным энергопотреблением отличаются ИОН, изготовленные по КМОП-технологии (0,9 мкА для ISL60002). Минимальный рабочий ток параллельных ИОН находится в пределах от 0,6 мкА (LT1389-1.2) до 1 мА (TL431).

### Конструктивное исполнение и монтаж

ИОН выпускаются в различных металло-стеклянных, металлокерамических и пластмассовых корпусах для монтажа в отверстия и поверхностного монтажа с количеством выводов от двух до двадцати. Механические напряжения в кристалле, вызванные различиями температурных коэффициентов расширения (ТКР) кремния и материалов корпуса и печатной платы, изменяют геометрические размеры кристалла и электрические характеристики элементов интегральной схемы. Это сказывается на ТКН и долговременной стабильности. Наиболее стабильны ИОН в металлостеклянных коваровых корпусах,

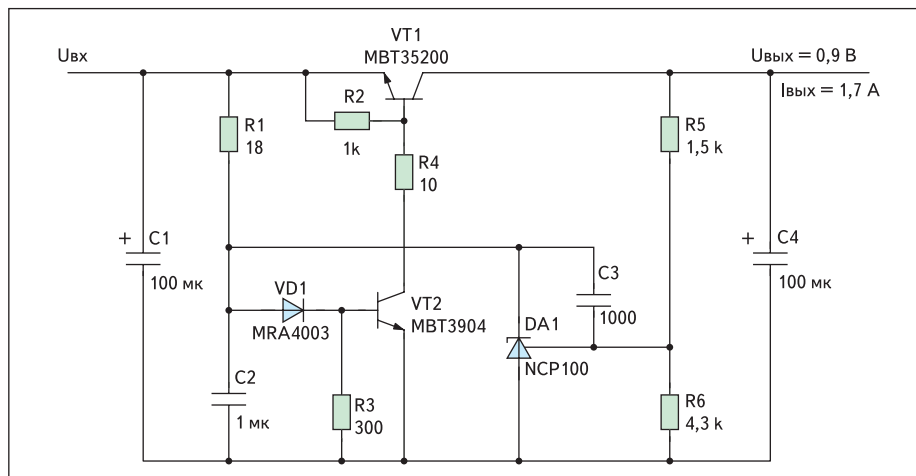


Рис. 3

у которых ТКР кристалла и корпуса имеют близкие значения, а проволочные выводы практически устраняют влияние деформации печатной платы.

В справочных данных на VRE41xx рекомендуется устанавливать микросхему на краю печатной платы, где минимальны механические напряжения и перегрев. Дополнительно уменьшить воздействия можно, сделав вокруг микросхемы U-образный вырез.

### Области применения

Основные области применения ИОН — источники питания, зарядные устройства, измерительная техника. Если в источниках питания зачастую можно обойтись компонентами с не слишком высокими характеристиками, то в измерительной технике характеристики ИОН могут иметь определяющее значение. Особенно важны температурный дрейф и уровень шумов, значение которых возрастает с повышением точности измерительного устройства. Для обеспечения дополнительной температурной погрешности в схеме с 14-разрядным АЦП, равной 0,5 МЗР в диапазоне температур от  $-40$  до  $+85$  °С, ТКН ИОН должен быть не более  $0,5 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$  [2]. На рис. 3 показана схема линейного стабилизатора напряжения с использованием NCP100. В [4] приведен пример

использования микросхемы VRE3050 в качестве ИОН для 16-разрядного АЦП.

Ранее речь шла об интегральных ИОН, вся схема которых выполнена в одном кристалле. Фирмой Thaler по технологии гибридных интегральных схем выпускаются ИОН с исключительно высокими характеристиками. В качестве примера в таблицу 4 включены характеристики микросхемы VRE3025.

Кроме отдельных ИОН производится ряд комбинированных микросхем, сочетающих в себе ИОН с операционными усилителями или компараторами.

### Литература

1. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. М.: Издательский дом «Додэка-XXI». 2005.
2. Miller P., Moore D. Precision Voltage Reference. SLYT183. Texas Instruments Inc.
3. Шитиков А. Выбор источника опорного напряжения // Электронные компоненты. 2002. № 3.
4. The Effect of Long-Term Drift on Voltage Reference. Application Notes AN-713. Analog Devices Inc.
5. Miller P., Moore D. The Design and Performance of a Precision Voltage Reference Circuit for 14-bit and 16-bit A-to-D and D-to-A Converters. SLYT168. Texas Instruments Inc.