مراجع ولتاژ و جریان

ابزاردقیق الکترونیکی پیشرفته

معرفی مباحث

- کاربرد مراجع جریان و ولتاژ
  - خواص مهم مراجع
- مراجع ولتاژ
  - معرفی IC های متداول
  - مراجع ولتاژ خاص
  - مثال
- مراجع جریان
  - معرفی چند IC مرجع جریان
  - مدارات منبع جریان

کاربرد مراجع ولتاژ و منابع جریان

- سطح ولتاژ مرجع برای مبدل های داده (A/D D/A)
- استفاده از ولتاژ مرجع در پل سنسوری بجای منبع تغذیه
  - کاهش اثر PSRR و نویز
- استفاده در سلولهای الکتروشیمی
- استفاده از منابع جریان در اندازه گیری مقاومت
- استفاده در مدارات واسط سنسور مستقل از مقاومت سیم

پارامتر های مهم مراجع ولتاژ

- دقت اولیه
- حساسیت نسبت به تغییرات ولتاژ ورودی
- حساسیت دما
- محدوده دمای کاری
- حداقل اختلاف ولتاژ ورودی و خروجی
- نویز خروجی
- حداکثر جریان خروجی
- جریان (توان) بیکاری
- نرخ تغییرات زمانی بلند مدت

انواع IC های مرجع ولتاژ

- توپولوژی
  - سری
  - موازی
- تکنولوژی
  - دیود زنر
  - Bandgap
  - مراجع مبتنی بر XFET
  - مراجع مبتنی بر دیود زنر مدفون
  - مراجع مبتنی بر EEPROM
- سایر دسته بندی ها
  - ثابت یا متغیر
  - متغیر با کنترل دیجیتال یا آنالوگ

پارامتر های مهم مراجع ولتاژ

Table 1.

Parameter	AD586J Min	AD586J Typ	AD586J Max	AD586K/AD586A Min	AD586K/AD586A Typ	AD586K/AD586A Max	AD586L/AD586B Min	AD586L/AD586B Typ	AD586L/AD586B Max	Unit
OUTPUT VOLTAGE	4.980		5.020	4.995		5.005	4.9975		5.0025	V
OUTPUT VOLTAGE DRIFT[1]										
0°C to 70°C			25			15			5	ppm/°C
−55°C to +125°C										ppm/°C
GAIN ADJUSTMENT	+6			+6			+6			%
	−2			−2			−2			%
LINE REGULATION[1]										
10.8 V < + V_{IN} < 36 V										
T_{MIN} to T_{MAX}			±100			±100			±100	µV/V
11.4 V < +V_{IN} < 36 V										
T_{MIN} to T_{MAX}										µV/V
LOAD REGULATION[1]										
Sourcing 0 mA < I_{OUT} < 10 mA										
25°C			100			100			100	µV/mA
T_{MIN} to T_{MAX}			100			100			100	µV/mA
Sinking −10 mA < I_{OUT} < 0 mA										
25°C			400			400			400	µV/mA
QUIESCENT CURRENT		2	3		2	3		2	3	mA
POWER CONSUMPTION		30			30			30		mW
OUTPUT NOISE										
0.1 Hz to 10 Hz		4			4			4		µV p-p
Spectral Density, 100 Hz		100			100			100		nV/√Hz
LONG-TERM STABILITY		15			15			15		ppm/1000 hr
SHORT-CIRCUIT CURRENT-TO-GROUND		45	60		45	60		45	60	mA
TEMPERATURE RANGE										
Specified Performance[2]	0		70	0	(K grade)	70	0	(L grade)	70	°C
				−40	(A grade)	+85	−40	(B grade)	+85	°C
Operating Performance[3]	−40		+85	−40		+85	−40		+85	°C

پارامتر های مهم مراجع ولتاژ: AD586

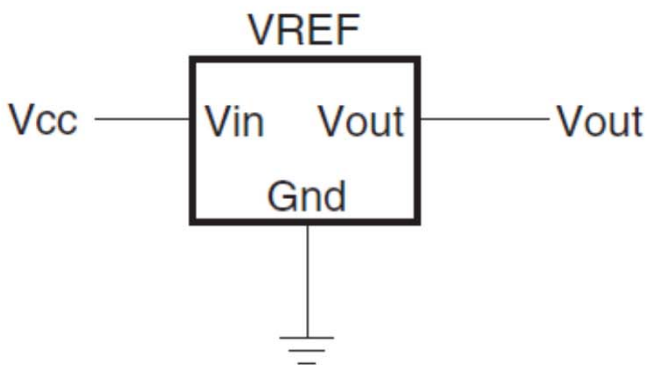
Table 1.

Parameter	AD586J Min	AD586J Typ	AD586J Max	AD586K/AD586A Min	AD586K/AD586A Typ	AD586K/AD586A Max	AD586L/AD586B Min	AD586L/AD586B Typ	AD586L/AD586B Max	Unit
OUTPUT VOLTAGE	4.980		5.020	4.995		5.005	4.9975		5.0025	V
OUTPUT VOLTAGE DRIFT[1]										
0°C to 70°C			25			15			5	ppm/°C
−55°C to +125°C										ppm/°C
GAIN ADJUSTMENT	+6			+6			+6			%
	−2			−2			−2			%
LINE REGULATION[1]										
10.8 V < + V_{IN} < 36 V										
T_{MIN} to T_{MAX}			±100			±100			±100	µV/V
11.4 V < +V_{IN} < 36 V										
T_{MIN} to T_{MAX}										µV/V
LOAD REGULATION[1]										
Sourcing 0 mA < I_{OUT} < 10 mA										
25°C			100			100			100	µV/mA
T_{MIN} to T_{MAX}			100			100			100	µV/mA
Sinking −10 mA < I_{OUT} < 0 mA										
25°C			400			400			400	µV/mA
QUIESCENT CURRENT		2	3		2	3		2	3	mA
POWER CONSUMPTION		30			30			30		mW
OUTPUT NOISE										
0.1 Hz to 10 Hz		4			4			4		µV p-p
Spectral Density, 100 Hz		100			100			100		nV/√Hz
LONG-TERM STABILITY		15			15			15		ppm/1000 hr
SHORT-CIRCUIT CURRENT-TO-GROUND		45	60		45	60		45	60	mA
TEMPERATURE RANGE										
Specified Performance[2]	0		70	0	(K grade)	70	0	(L grade)	70	°C
				−40	(A grade)	+85	−40	(B grade)	+85	°C
Operating Performance[3]	−40		+85	−40		+85	−40		+85	°C

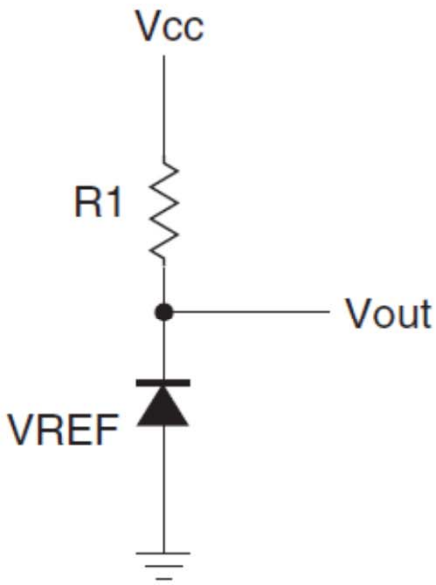
مراجع ولتاژ: مقایسه با رگولاتور LM7805

Parameter	Symbol	Conditions		MC7805/LM7805 Min.	Typ.	Max.	Unit
Output Voltage	V_O	T_J =+25 °C		4.8	5.0	5.2	V
		5.0mA ≤ Io ≤ 1.0A, P_O ≤ 15W V_I = 7V to 20V		4.75	5.0	5.25	
Line Regulation (Note1)	Regline	T_J=+25 °C	V_O = 7V to 25V	-	4.0	100	mV
			V_I = 8V to 12V	-	1.6	50	
Load Regulation (Note1)	Regload	T_J=+25 °C	I_O = 5.0mA to1.5A	-	9	100	mV
			I_O =250mA to 750mA	-	4	50	
Quiescent Current	I_Q	T_J =+25 °C		-	5.0	8.0	mA
Quiescent Current Change	ΔI_Q	I_O = 5mA to 1.0A		-	0.03	0.5	mA
		V_I= 7V to 25V		-	0.3	1.3	
Output Voltage Drift	$\Delta V_O/\Delta T$	I_O= 5mA		-	-0.8	-	mV/ °C
Output Noise Voltage	V_N	f = 10Hz to 100KHz, T_A=+25 °C		-	42	-	µV/Vo
Ripple Rejection	RR	f = 120Hz V_O = 8V to 18V		62	73	-	dB
Dropout Voltage	V_{Drop}	I_O = 1A, T_J =+25 °C		-	2	-	V
Output Resistance	r_O	f = 1KHz		-	15	-	mΩ
Short Circuit Current	I_{SC}	V_I = 35V, T_A =+25 °C		-	230	-	mA
Peak Current	I_{PK}	T_J =+25 °C		-	2.2	-	A

مراجع سری و موازی



Series Mode



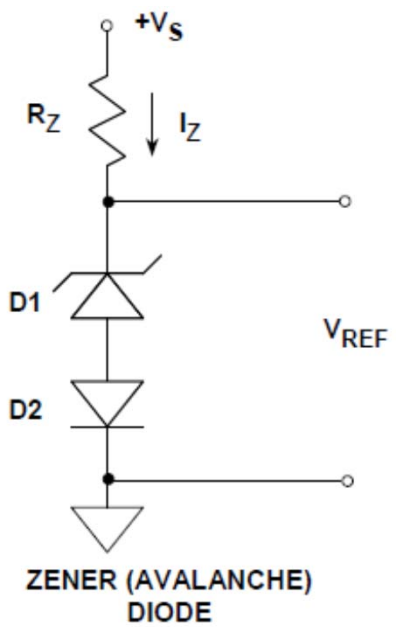
Shunt Mode

- مراجع سری:
- دقت بالاتر و نویز کمتر
- تحمل ولتاژ تغذیه محدود
- تولید ولتاژ مثبت

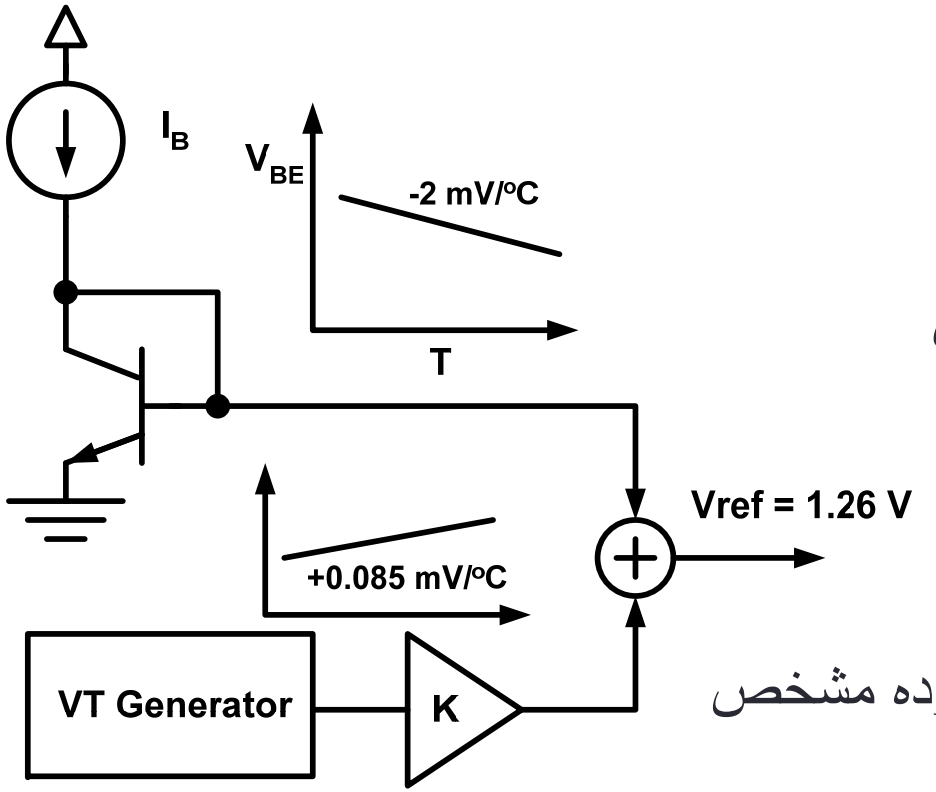
- مرجع موازی:
- معمولا دقت کمتری دارند
- جریان مصرفی پایین
- قابلیت کار با V_{CC} بالا
- قابلیت استفاده برای تولید ولتاژ منفی یا شناور

دیود زنر عادی

- ضریب حرارتی بالا: +2mV/°C
  - امکان سری کردن با دیود عادی (-2mV/°C) جهت صفر کردن ضریب حرارتی
- دقت ولتاژ خروجی پایین: تابع جریان دیود
- نویز بسیار زیاد
- نمونه IC بر پایه زنر عادی



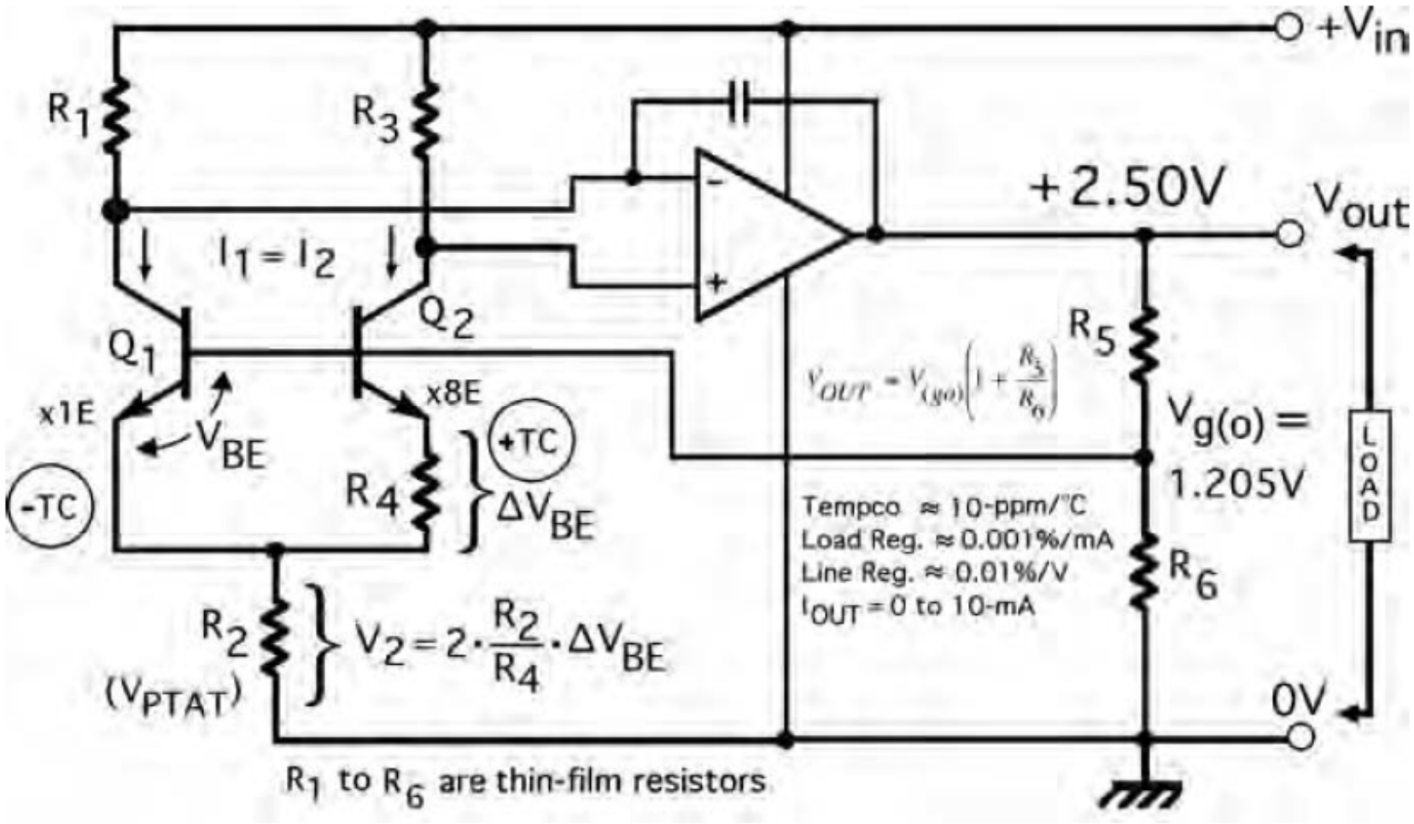
مرجع ولتاژ Bandgap



- تولید ولتاژ غیر وابسته به دما و جریان
- ضریب دمای V_{BE}: -2mV/°C
- ضریب دمای Vt: +0.085mV/°C
- قابلیت صفر شدن ضریب دما در محدوده مشخص
- ولتاژ خروجی طبیعی (بدون تقویت و تضعیف): حدود 1.24 ولت
- خصوصیات:
- ...

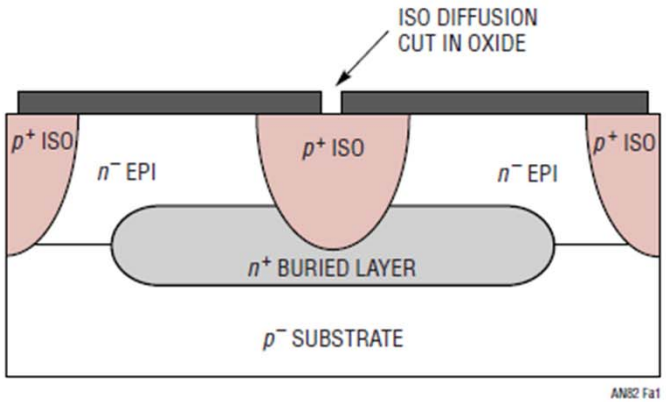
مثال: AD580

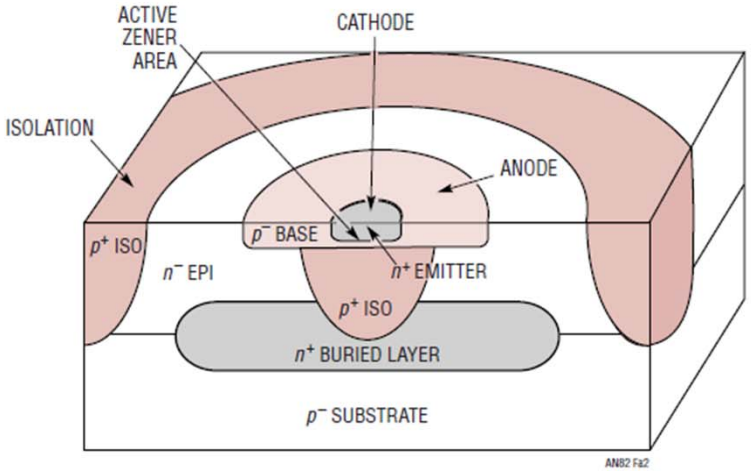
مرجع ولتاژ Bandgap



مثال: AD580
REF02

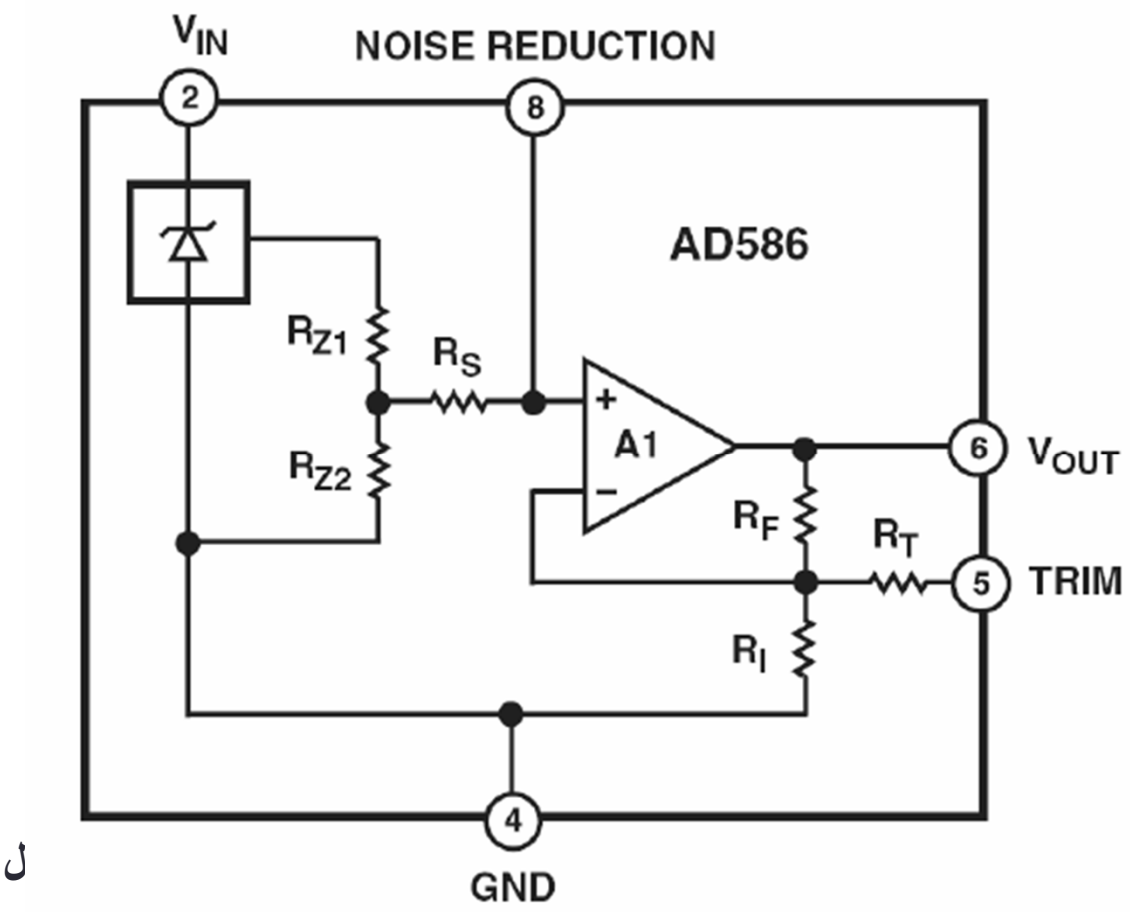
مرجع ولتاژ دیود زنر مدفون (Buried Zener Diode)





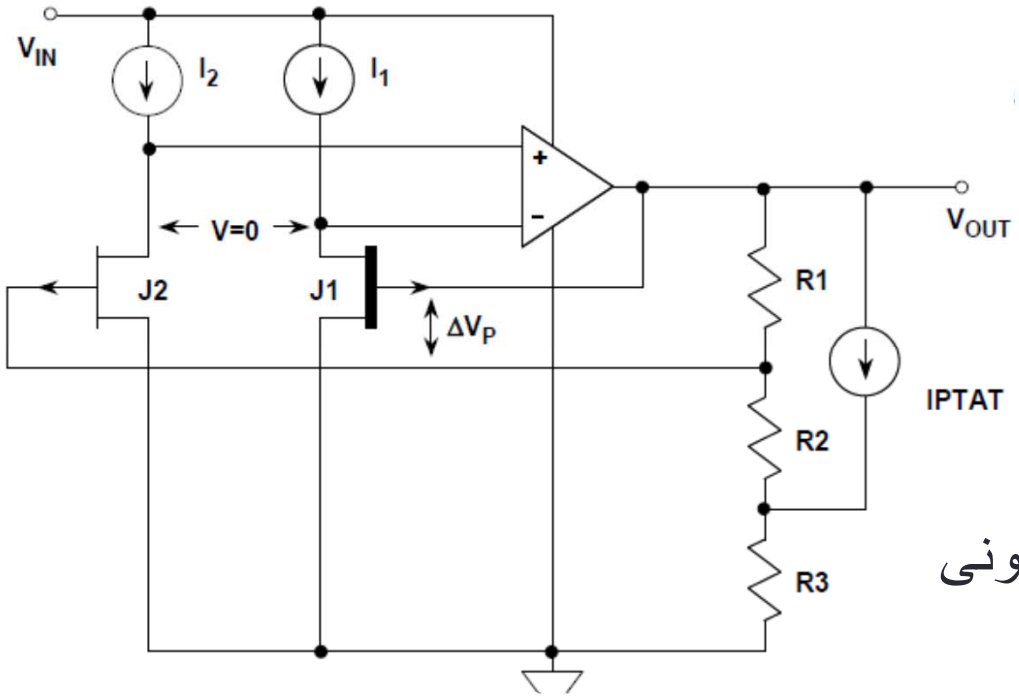
- دیود زنر مدفون: پیوند PN غیر سطحی:
  - کاهش قابل ملاحظه نویز به دلیل نبودن Trap در زیر سطح
- تغییرات دمایی بسیار کم
- نویز بسیار کم
- جریان مصرفی بالا

مرجع ولتاژ دیود زنر مدفون (Buried Zener Diode)



AD586 :ل
AD588

مرجع ولتاژ XFET



$$V_{OUT} = \Delta V_P\left(1+\frac{R2+R3}{R1}\right)+(I_{PTAT})(R3)$$

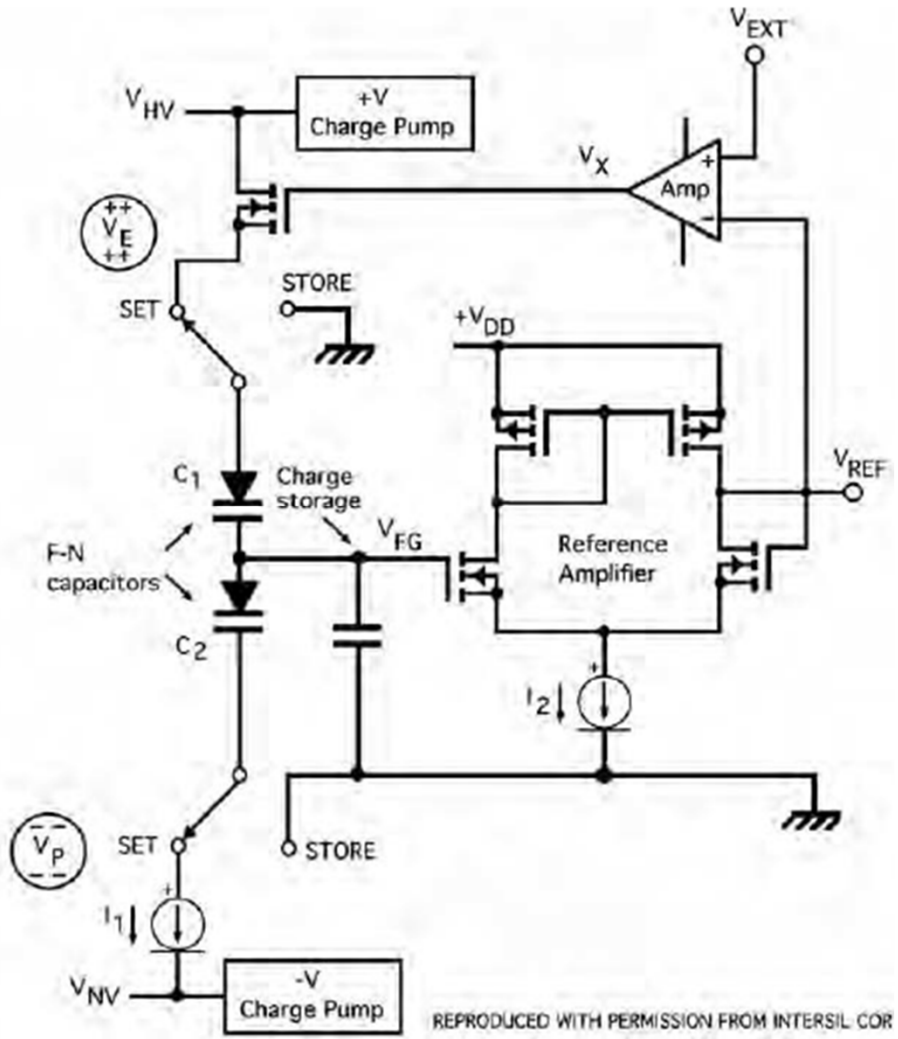
- تکنولوژی اختصاصی AD
- مشابهت با مدار Bandgap
- ترانزیستور JFET با کاشت یونی
- ΔV_P: ضریب حرارتی منفی: -120ppm/°C
- IPTAT: ضریب حرارتی مثبت
- مزایا
  - جریان بیکاری بسیار پایین
  - ضریب دمایی بسیار کم (3-8ppm/°C) و بسیار خطی
  - نویز بسیار کم به نسبت جریان مصرفی

مثال: ADR431

مقایسه تکنولوژی های رایج ولتاژ مرجع

BANDGAP	BURIED ZENER	XFET®
< 5V Supplies	> 5V Supplies	< 5V Supplies
High Noise @ High Power	Low Noise @ High Power	Low Noise @ Low Power
Fair Drift and Long Term Stability	Good Drift and Long Term Stability	Excellent Drift and Long Term Stability
Fair Hysteresis	Fair Hysteresis	Low Hysteresis

FGA (Floating Gate Analog) مرجع ولتاژ



- ذخیره ولتاژ آنالوگ اولیه بر روی گیت شناور ترانزیستور: پیش از Packaging
- بافر کردن ولتاژ ذخیره شده به خروجی
- ذخیره ولتاژ بجای «تولید» ولتاژ
- قابلیت ذخیره ولتاژ برای 10 سال
- تکنولوژی اختصاصی Intersil
- جریان مصرفی بسیار پایین
- دقت اولیه بسیار بالا
- حساسیت دمایی پایین

مثال: X60008

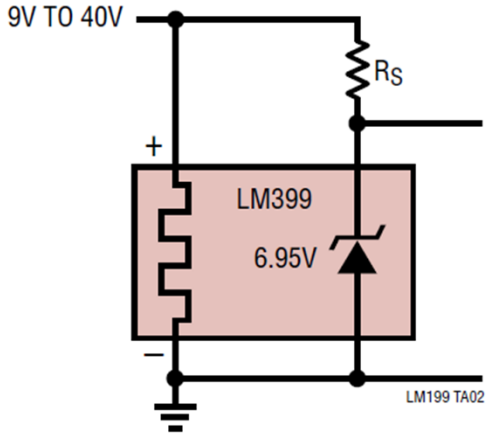
مقایسه چهار IC مرجع

Topology →		Traditional series bandgap	Super bandgap (Typical)	Buried-Zener (Typical)	ADI XFET® (ADR435B)	Xicor (3) FGA™ (x60008B-50)
Specification:	unit					
Reference voltage	Volts	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000
Initial accuracy/tolerance	mV or %	2mV/0.04%	2mV/0.04%	±1mV/0.02%	2mV/0.04%	0.5mV/0.01%
Tempco/drift	ppm/°C	5 max	3 max	2 max	3 max	1 max
Long-term drift	ppm/1000-hrs	250 typ	40 typ	20 typ	40 typ	10 typ
Noise voltage (0.1-10Hz)	μV pk-pk	50	10 typ	3 typ	3.4 typ	30
Wideband noise @ 1KHz	nV/√Hz	n/s (2)	26μVrms	2μVrms typ	110 typ	<100 typ
Supply current	μA or mA	50μA max	750μA	2.4mA max	560 typ	0.8μA max
Input voltage range @ $5V_O$	Volts	5.5 - 15	5.2 - 30	8 - 40	7 - 18	5.1 - 9
Load current max.	mA	25	15	+10/-10	+30/-20	±10 max
Line regulation	ppm/V	4-ppm max	50μV/V max	6-ppm typ	35-ppm max	100μV/V max
Load regulation	ppm/mA	4-ppm max	0.1mV/mA	3-ppm typ	70-ppm max	50μV/mA max
Dropout voltage	Volts	0.5V max	0.2V max	2V typ	2V	0.3V max
Temperature range	°C	-40°/+85°	-40°/+85°	0°/+70°	-40°/+125°	-40°/+85°
Trimmable output (Trim pin)		No	Some	Yes	Yes	No

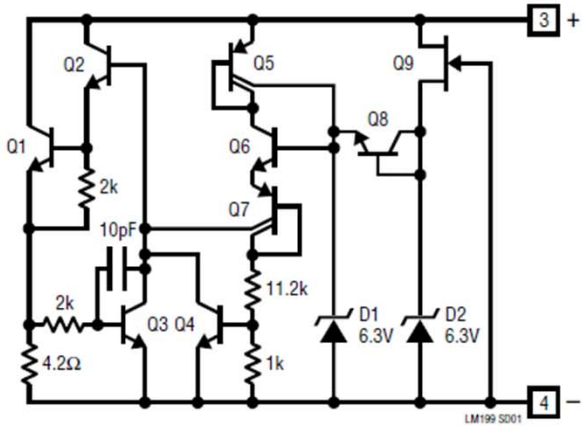
NOTES: 1. Specifications are for example 5-Volt output only. Specs may be different for other output voltages.
2. n/s = not specified. 3. Xicor is now a part of Intersil Corp.

مراجع ولتاژ با کنترل دمای داخلی

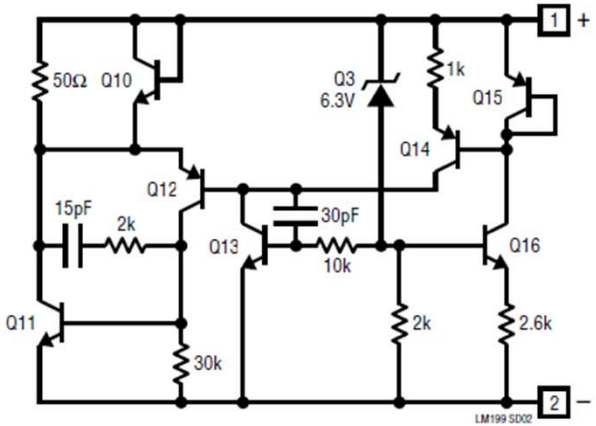
- استفاده از گرم کننده داخل IC جهت ثابت نگه داشتن دمای عناصر حساس به دما
- کاربرد عمده: مراجع با دیود زنر مدفون
- LM399: تنظیم دمای داخلی در حدود 90^{oC}
- دارای مدار های داخلی جداگانه تثبیت دما و ولتاژ مرجع
- ضریب حرارتی بسیار پایین:
  - $0.5ppm/^{oC}$ در LM300
  - $0.05ppm/^{oC}$ در LTZ1000



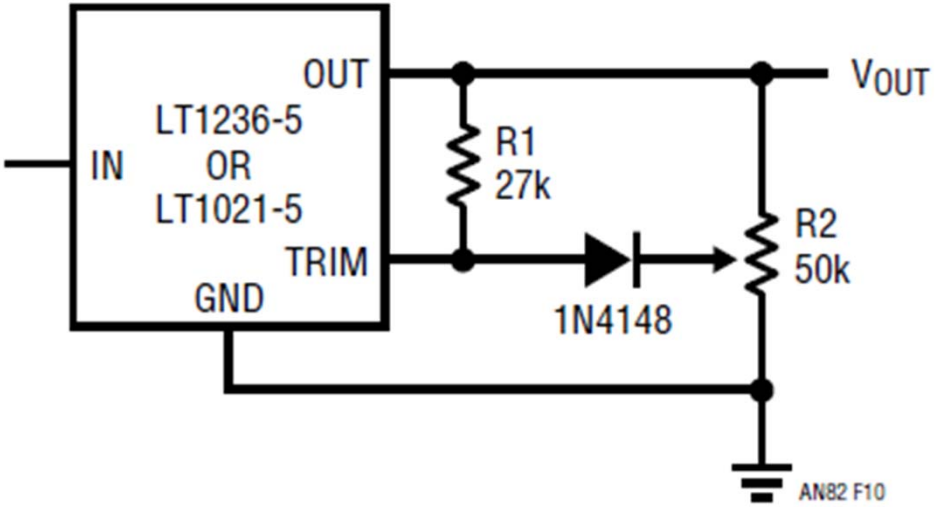
Temperature Stabilizer



Reference



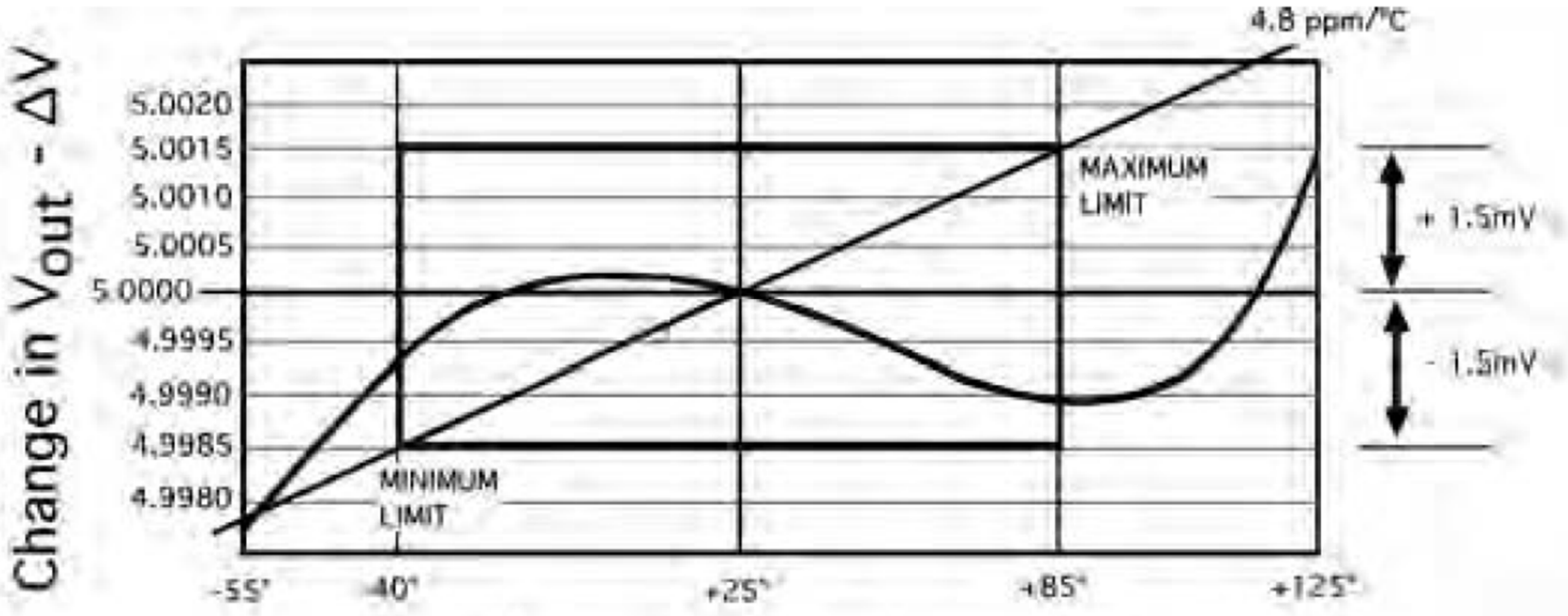
مدار های ولتاژ مرجع با امکان تنظیم دقیق



- وجود پایه تنظیم دقیق ولتاژ خروجی در برخی IC های ولتاژ مرجع
  - افزایش دقت اولیه ولتاژ خروجی مرجع
  - افزایش ضریب حرارتی ولتاژ خروجی به دلیل عدم تطابق مقاومتهای داخلی و خارجی

- مثال LT1021: قابلیت تغییر ولتاژ خروجی در حد ±0.7%

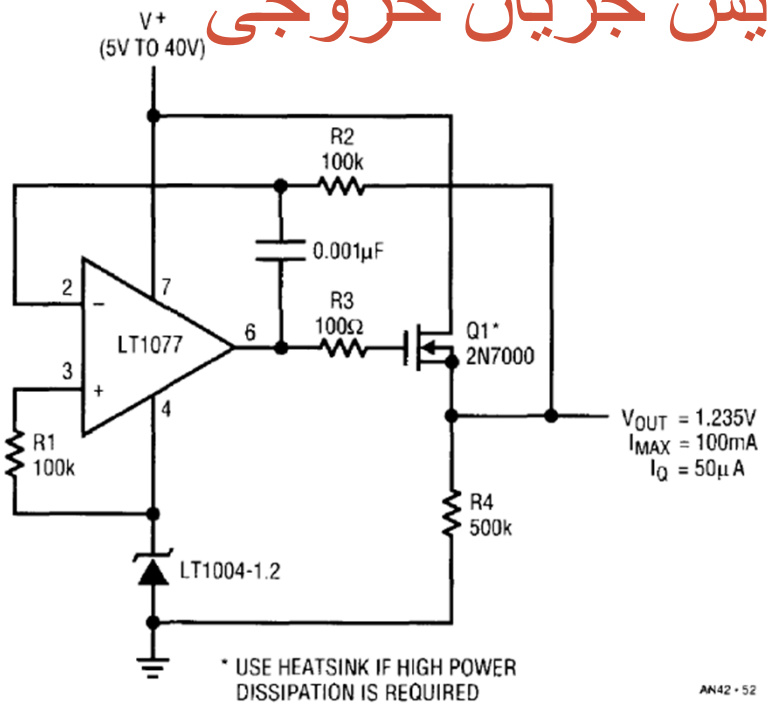
نحوه ارائه مشخصه ضریب حرارتی: Box Method

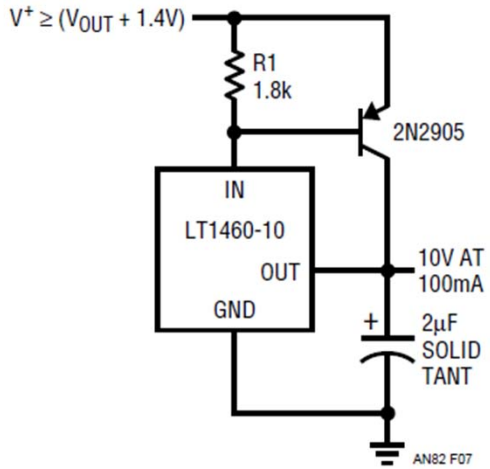


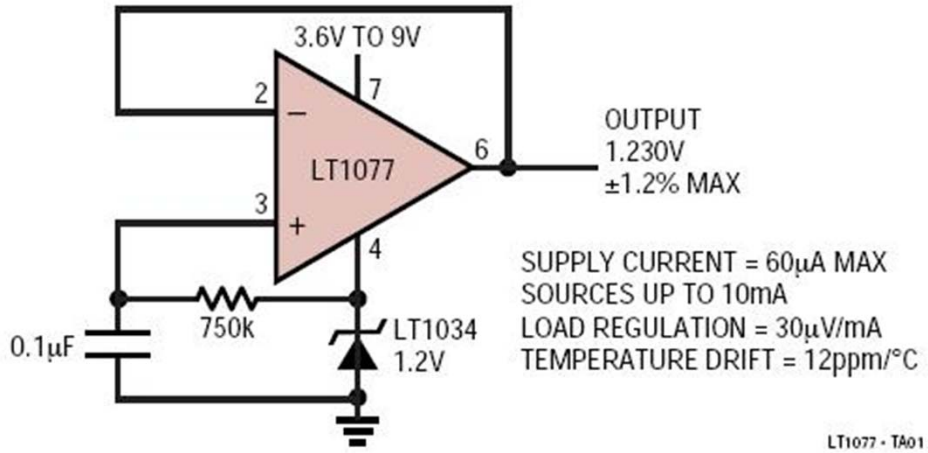
- محیط کردن یک مستطیل به مشخصه ولتاژ/دمای مرجع
- تعیین ضریب حرارتی متوسط بر حسب شیب قطر مستطیل

$$\text{AVERAGE TEMPERATURE COEFFICIENT} = \frac{V_{MAX} - V_{MIN}}{T_{MAX} - T_{MIN}} \left(\frac{V}{°C} \right)$$

افزایش قابلیتهای ولتاژ مرجع: افزایش جریان خروجی

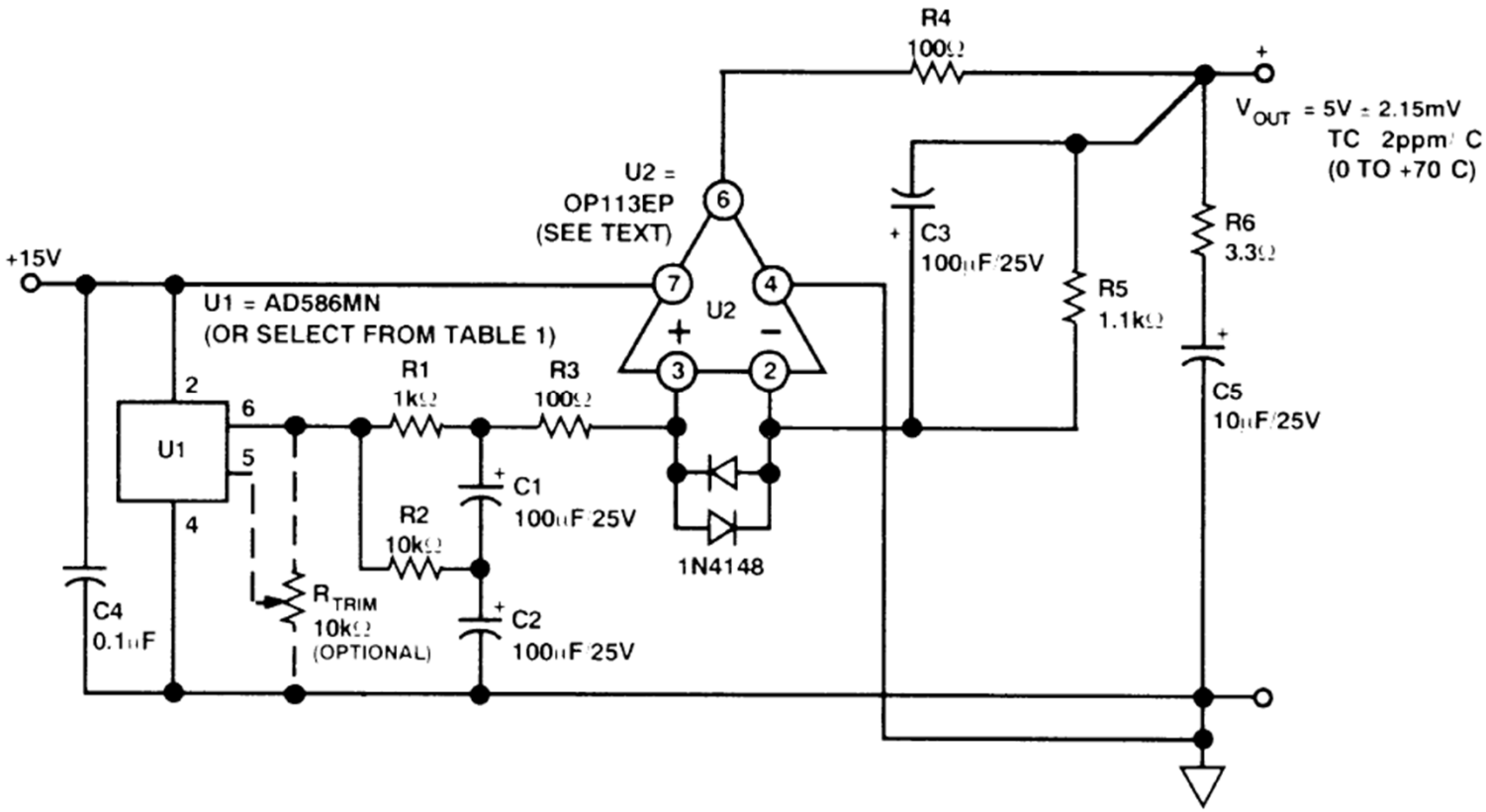






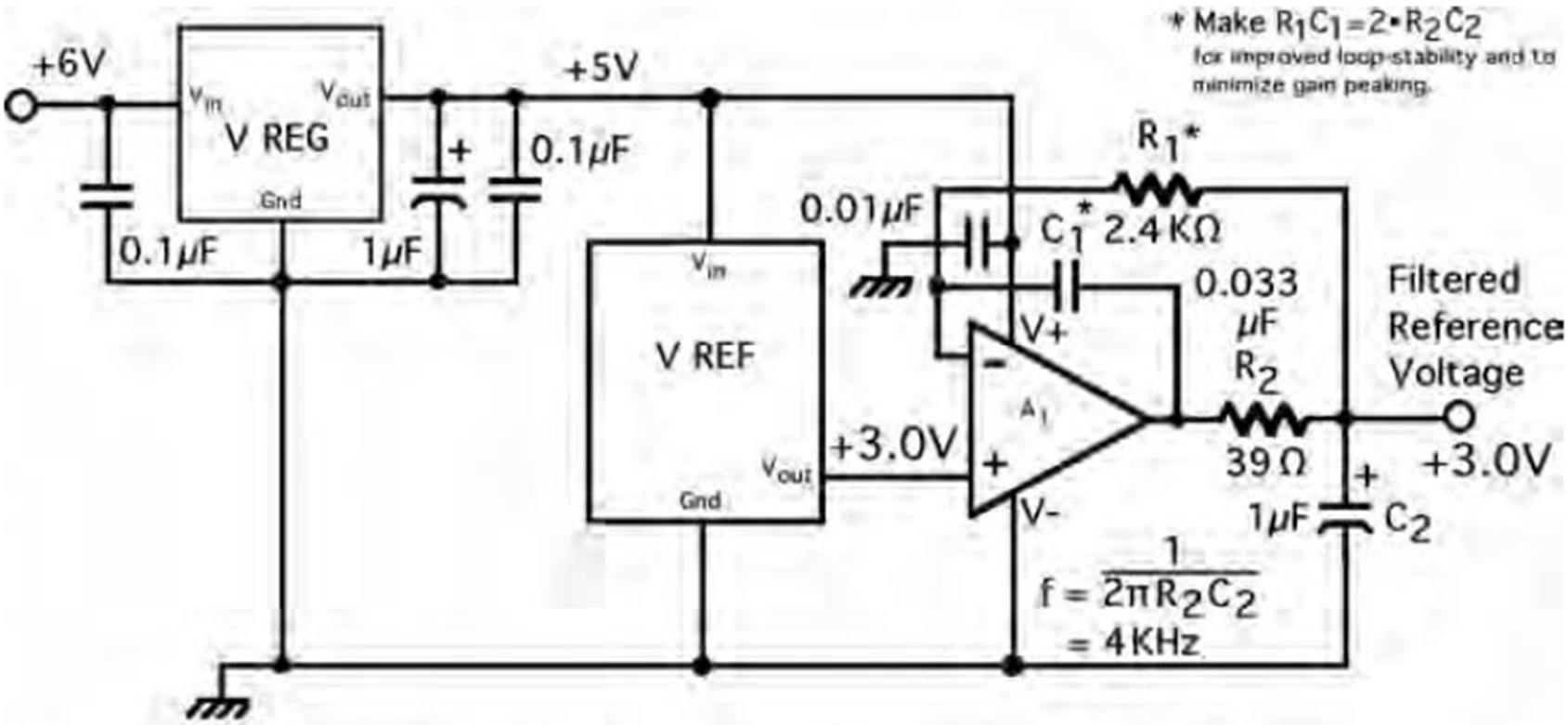
- استفاده از ترانزیستورکمکی
- استفاده از بافر با آپ-امپ

افزایش قابلیتهای ولتاژ مرجع: فیلتر خروجی



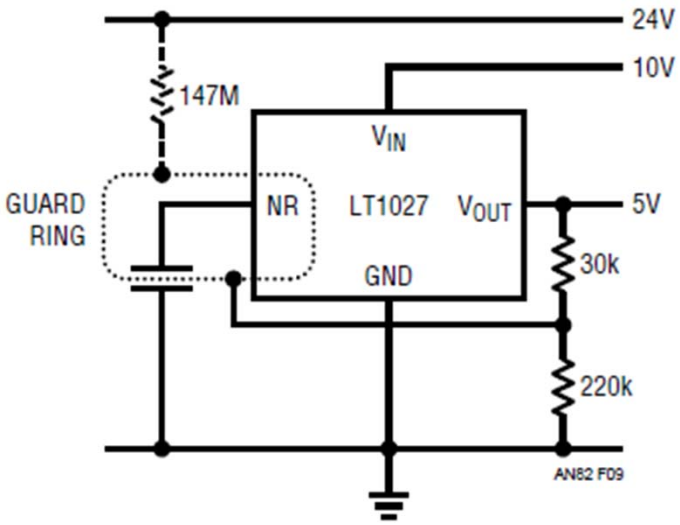
- استفاده از فیلتر پایین گذر مرتبه بالا برای کاهش نویز حرارتی
- نیاز به استفاده از آپ-امپ دقیق

افزایش قابلیتهای ولتاژ مرجع: پیش رگولاسیون



برخی نکات عملی در مورد استفاده از مراجع ولتاژ

- پایه های NC (Not connect): این پایه ها حتما بصورت fload بگذارید و به زمین یا گره دیگری از مدار وصل نکنید!

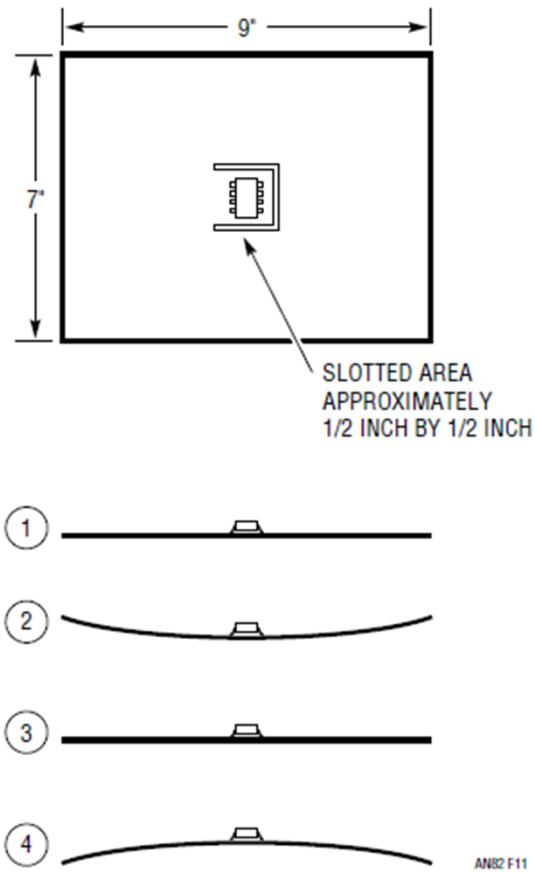


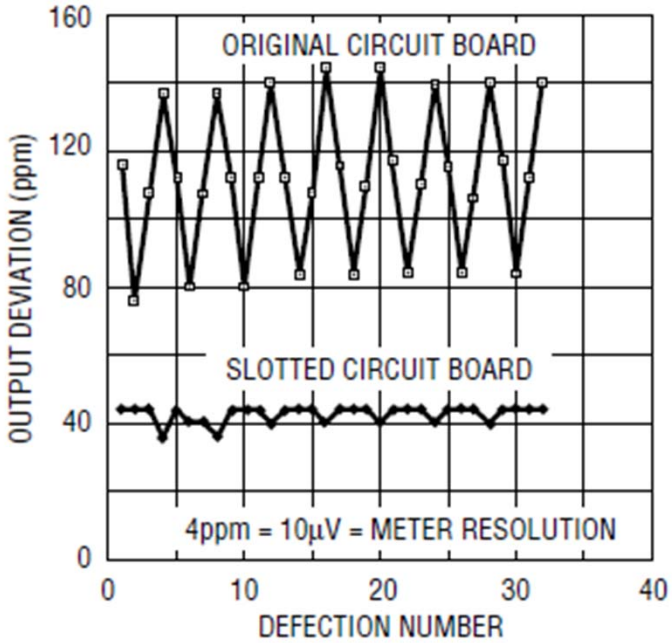
- پایه های کاهش نویز:
  - وجود پایه فیلتر نویز (اتصال خازن) در برخی ICها
  - حساسیت پایه فیلتر نویز به جریان نشتی PCB
  - پیشنهاد: Guard ring

- اگر نیازی به پایه تنظیم ندارید از آن استفاده نکنید!

برخی نکات عملی در مورد استفاده از مراجع ولتاژ

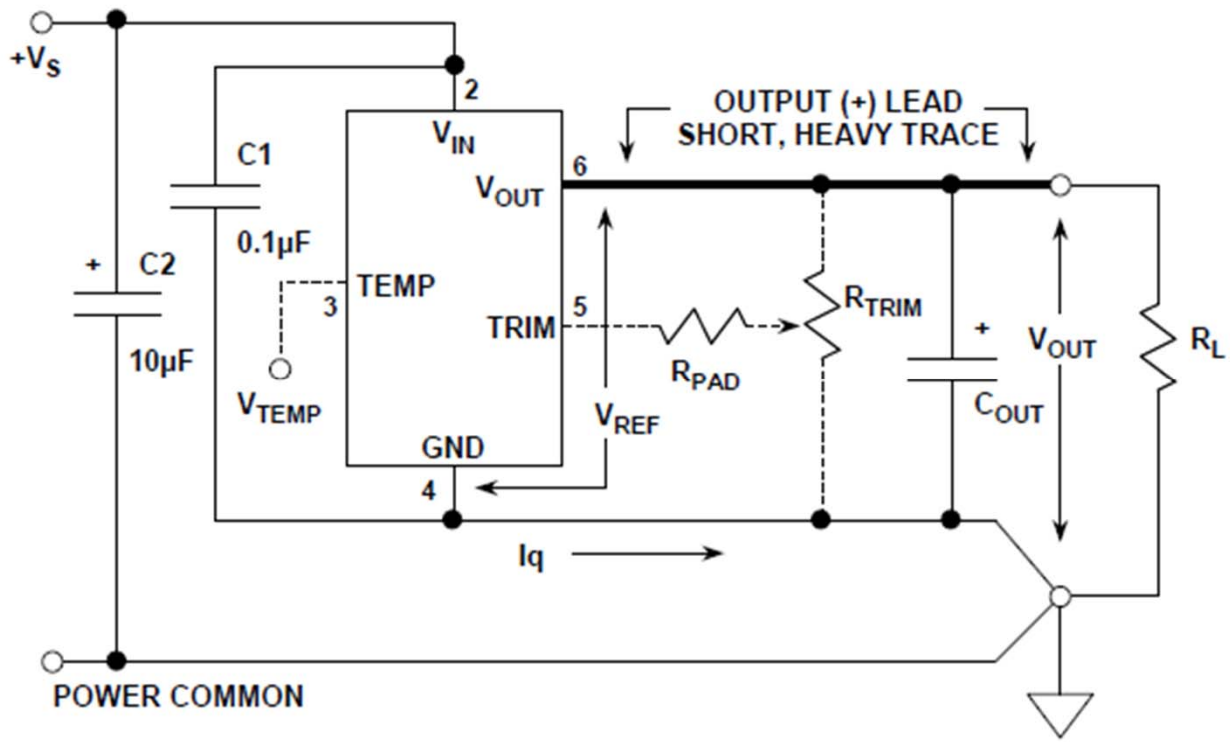
- استرس مکانیکی:مراجع ولتاژ با پکیج پلاستیکی حسایت زیادی به فشار مکانیکی دارند:





- عدم قرار داد
- تقویت مکانیکی PCB
- Slotting

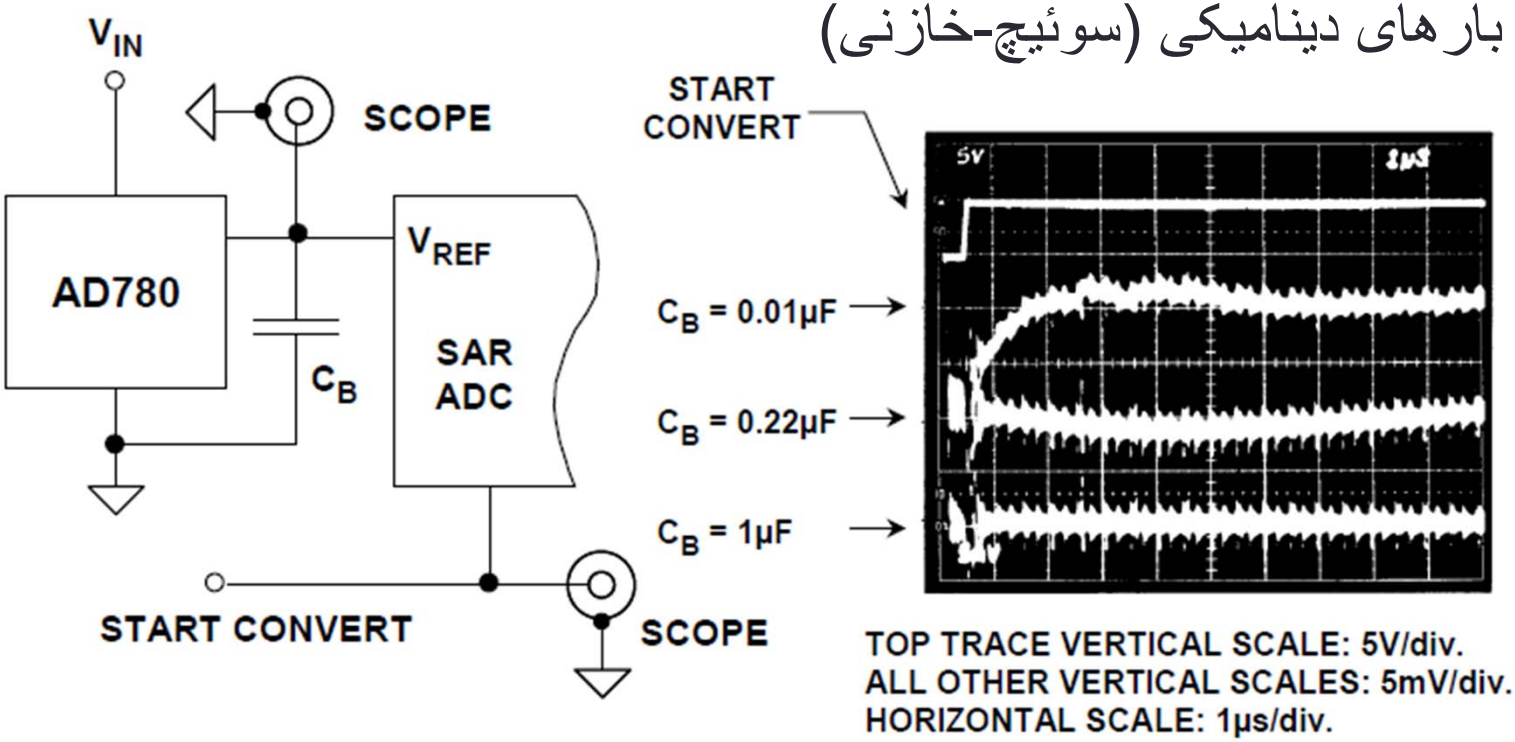
برخی نکات عملی در مورد استفاده از مراجع ولتاژ



- استفاده از خطوط پهن و کوتاه برای ولتاژ خروجی جهت کاهش افت اهمی ولتاژ
- استفاده از خازن در خروجی: به احتمال نا پایداری توجه شود!

برخی نکات عملی در مورد استفاده از مراجع ولتاژ

- اثر بارهای دینامیکی (سوئیچ-خازنی)



- استفاده از خازن bypass بزرگ
- مشکلات جانبی خازن؟

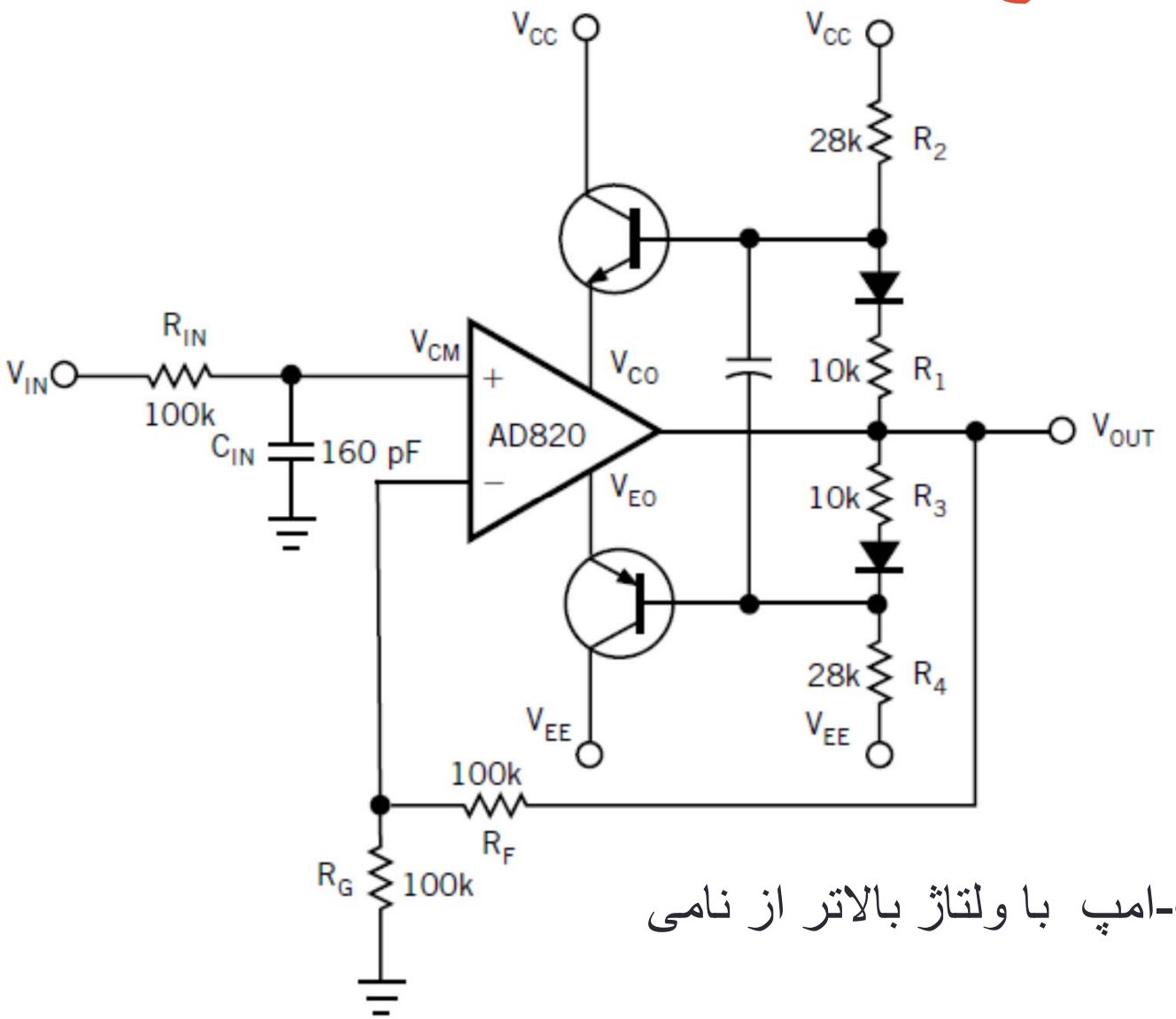
روشهای تولید سیگنال ولتاژ بالا

- چگونه از یک مدار آپ-امپی ولتاژ خروجی بالا بگیریم؟
- استفاده از آپ-امپ ولتاژ بالا
- بوت استراپینگ
- طبقه خروجی ولتاژ بالا

آپ-امپ های ولتاژ بالا

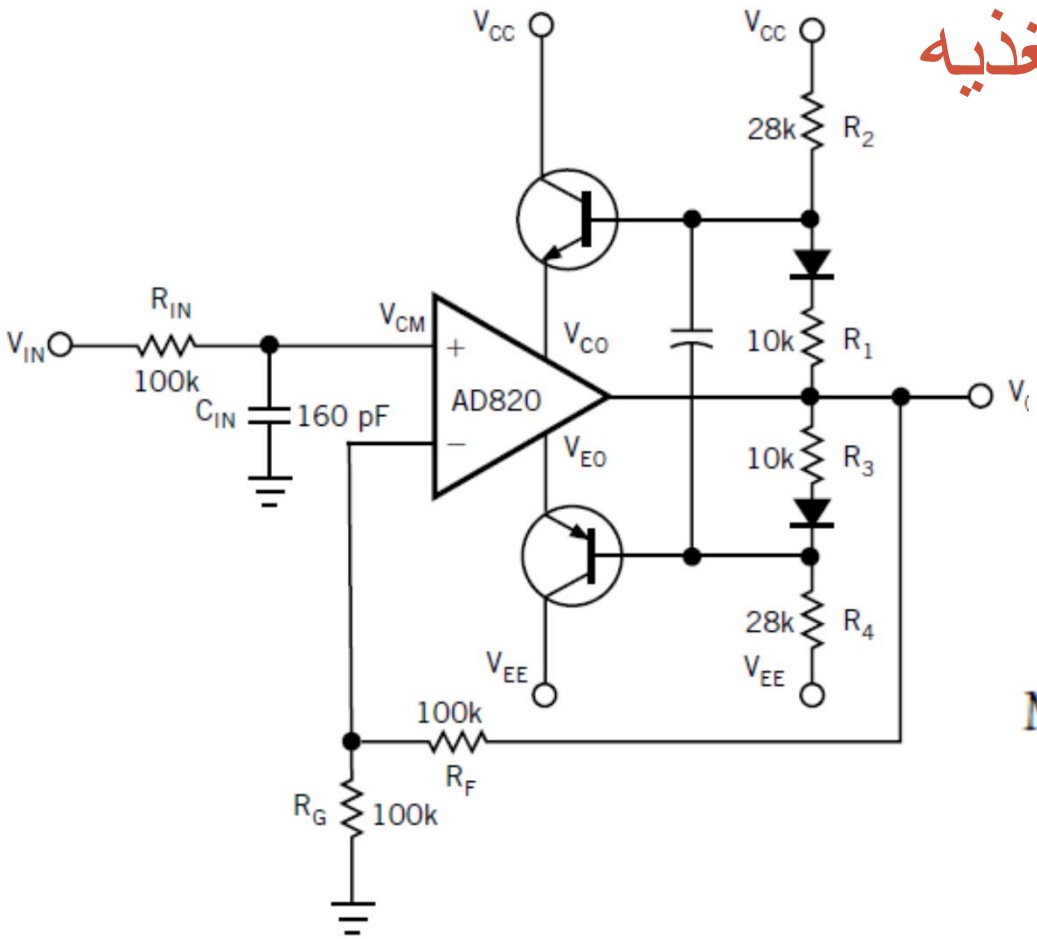
	Technology	Max Supply	Offset Voltage	Bias Current	UGBW
OPA445	BJT/JFET	±45V	1.5mV	100pA	2 MHz
ADA4700	BJT	±50V	200uV	15nA	2.5 MHz
LTC6090	CMOS	±70V	330uV	3pA	12 MHz

بوت استراپینگ منبع تغذیه



- امکان استفاده از آپ-امپ با ولتاژ بالاتر از نامی

بوت استراپینگ منبع تغذیه



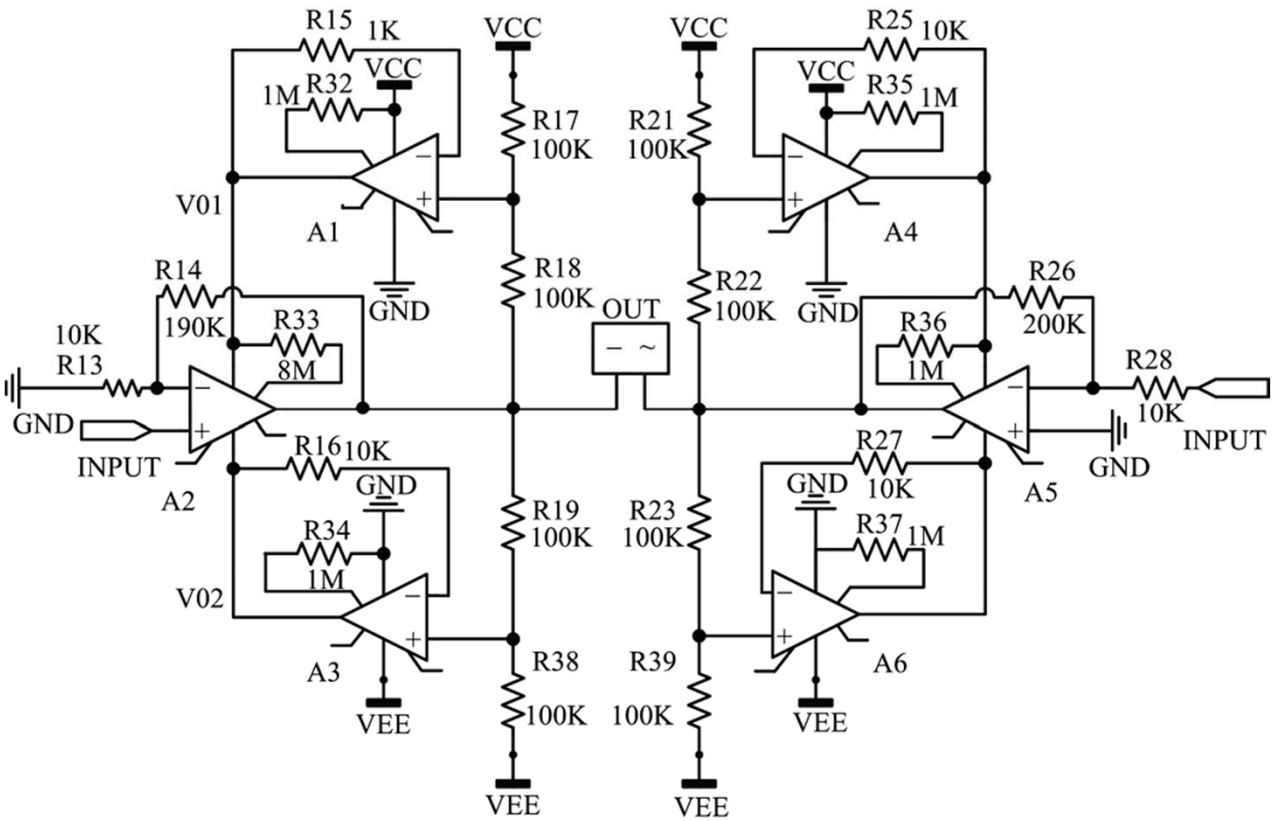
$$V_{CO} = \frac{V_{CC}R_1 + V_{OUT}R_2}{R_1 + R_2} - 0.6$$

$$V_{EO} = \frac{V_{EE}R_3 + V_{OUT}R_4}{R_3 + R_4} + 0.6$$

$$\text{MAX } V_{OUT} = V_{CC} - 0.6\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

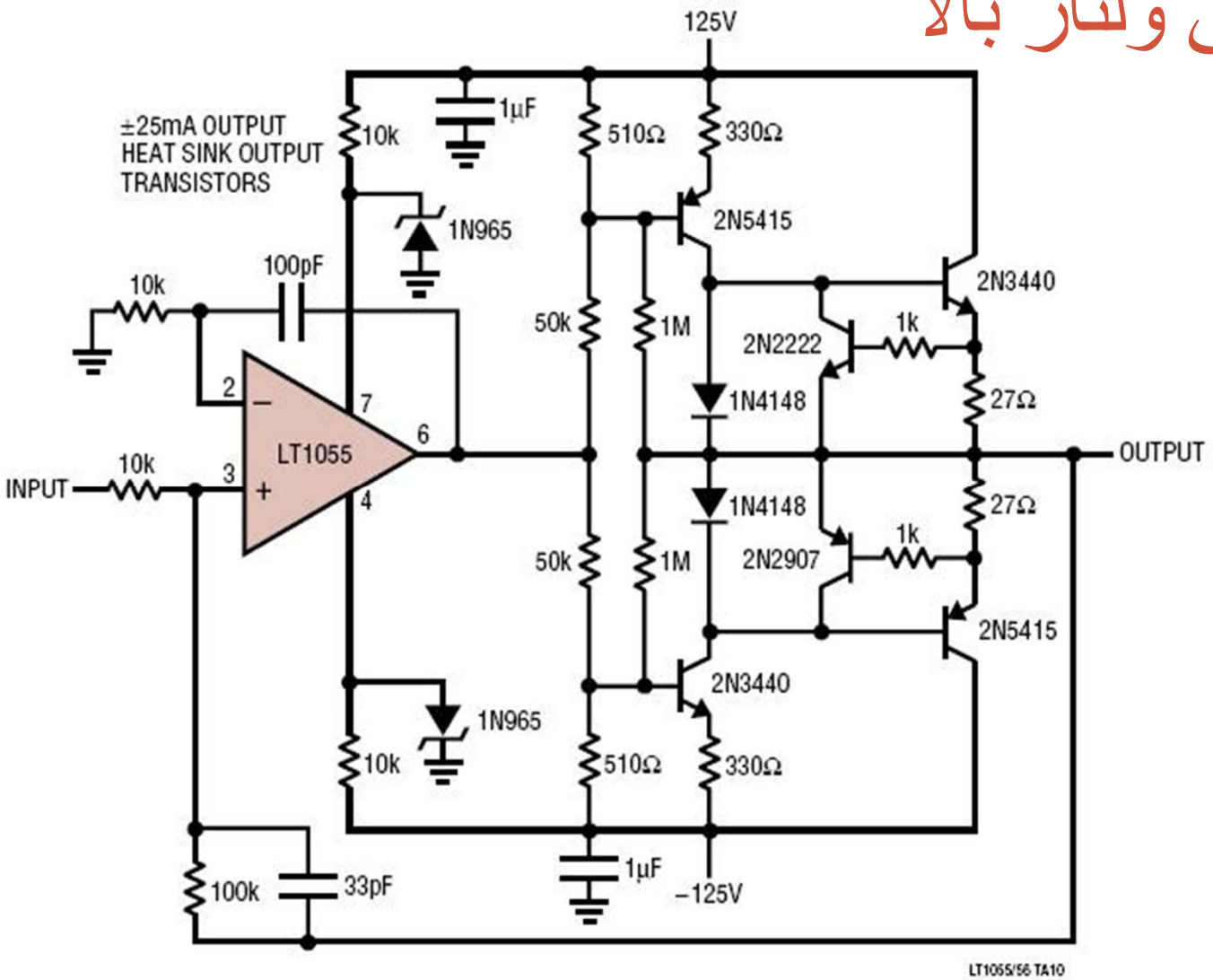
- امکان استفاده از آپ-امپ با ولتاژ بالاتر از نامی

بوت استراپینگ و استفاده از خروجی تمام تفاضلی



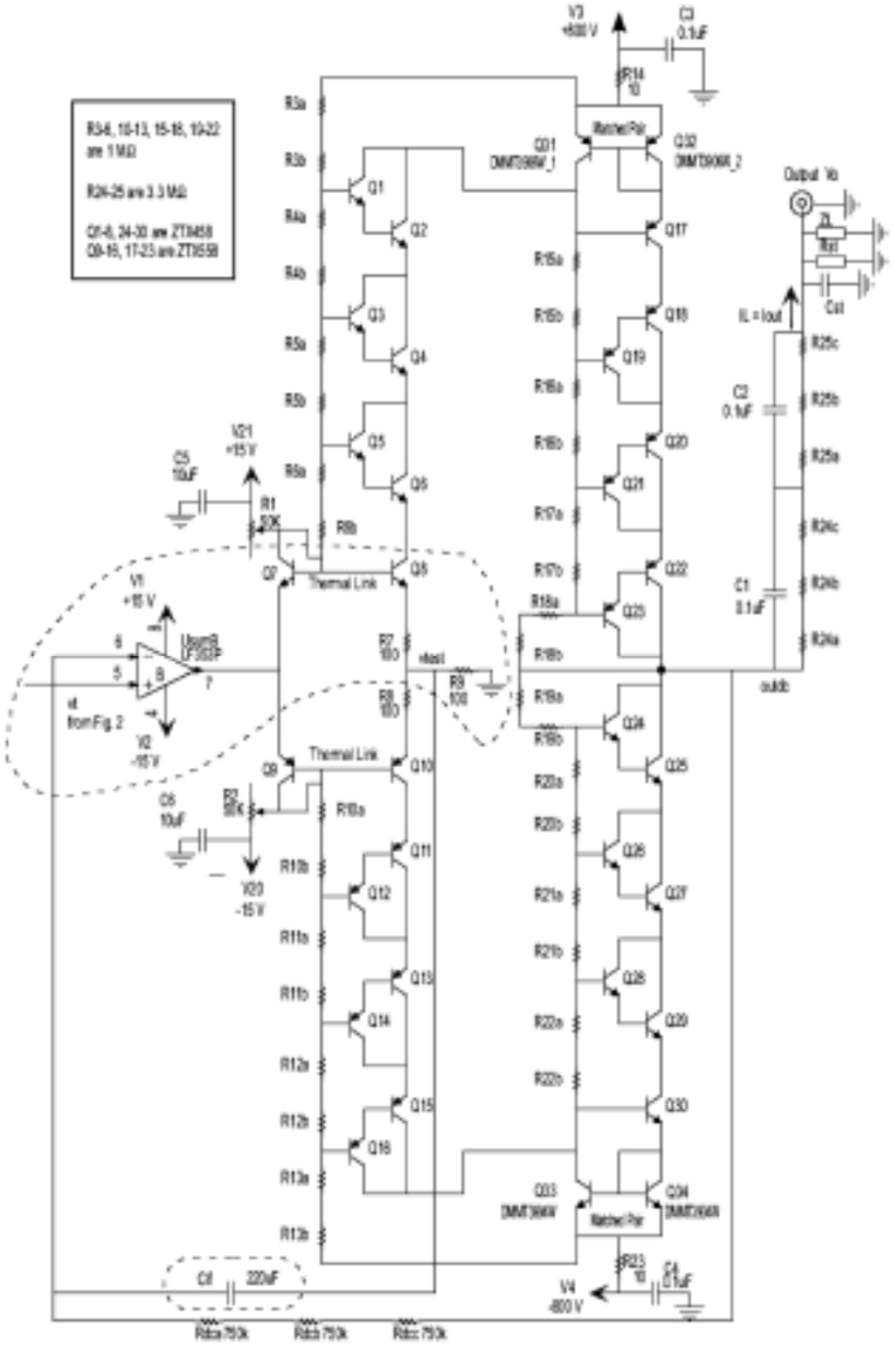
IEEE Trans Ind Elec 2015 •

طبقه خروجی ولتاژ بالا



- استفاده از بافر ولتاژ بالای خروجی

طبقه خروجی ولتاژ بالا



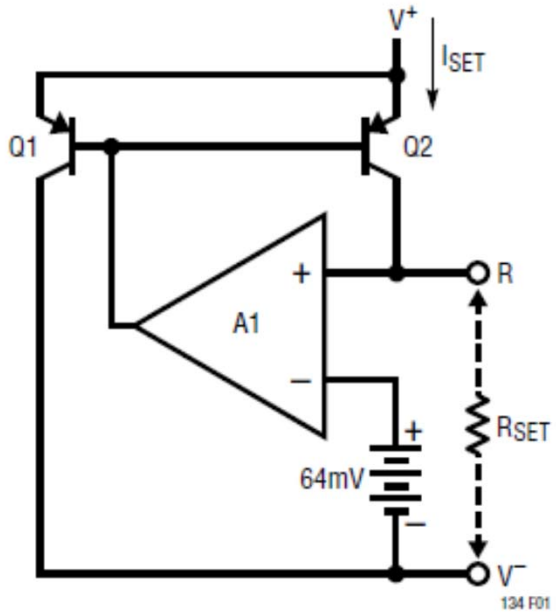
- خروجی 800 ولت بوسیله یک آپ امپ ولتاژ پایین

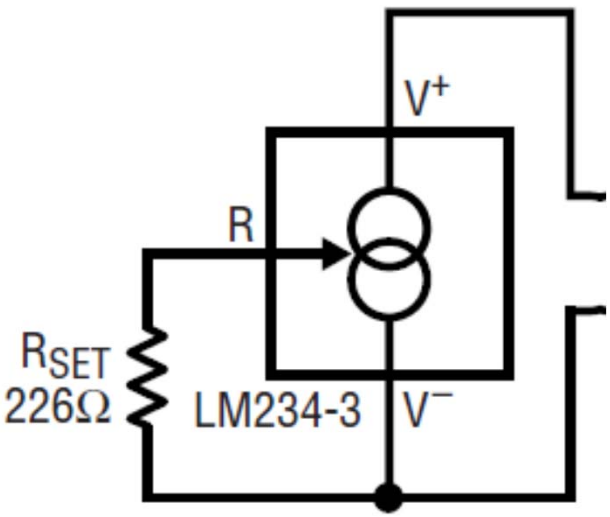
مراجع جریان

- مراجع با آپ-امپ
- مراجع IC
- مراجع ترانزیستوری (جریان بالا)

IC سری LM134

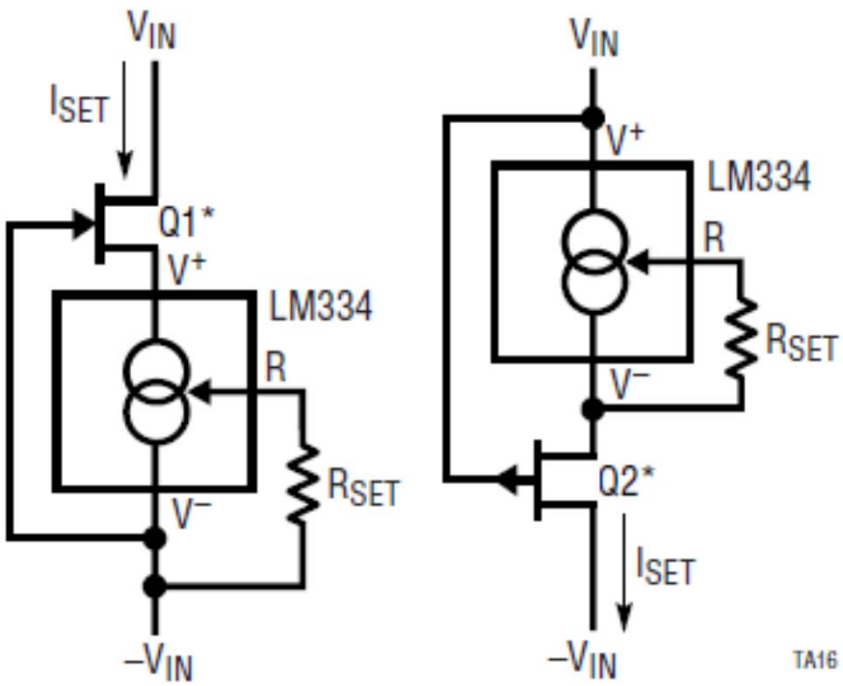
$$\left(\frac{64mV}{R_{SET}}\right)\left(\frac{18}{17}\right)=\frac{67.7mV}{R_{SET}}$$



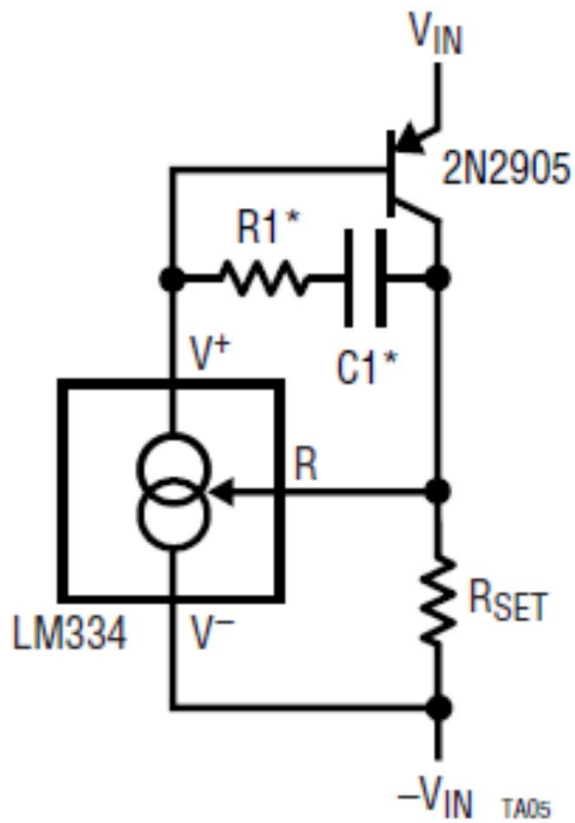


- بالای سی سال از طراحی اولیه
- تولید جریان خروجی از 1uA تا 10mA با مقاومت خروجی
- مقاومت خروجی بالای 1M به ازای حداکثر جریان
- حداقل ولتاژ خروجی: حداکثر 1V
- جریان خروجی PTAT

نمونه کاربردهای LM134

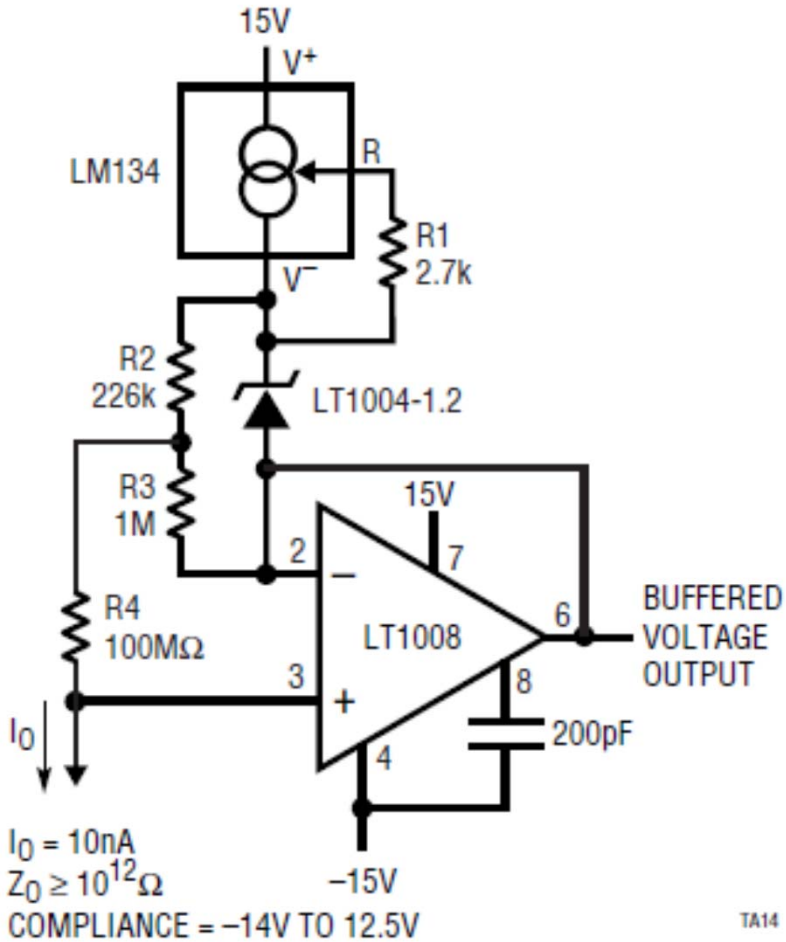


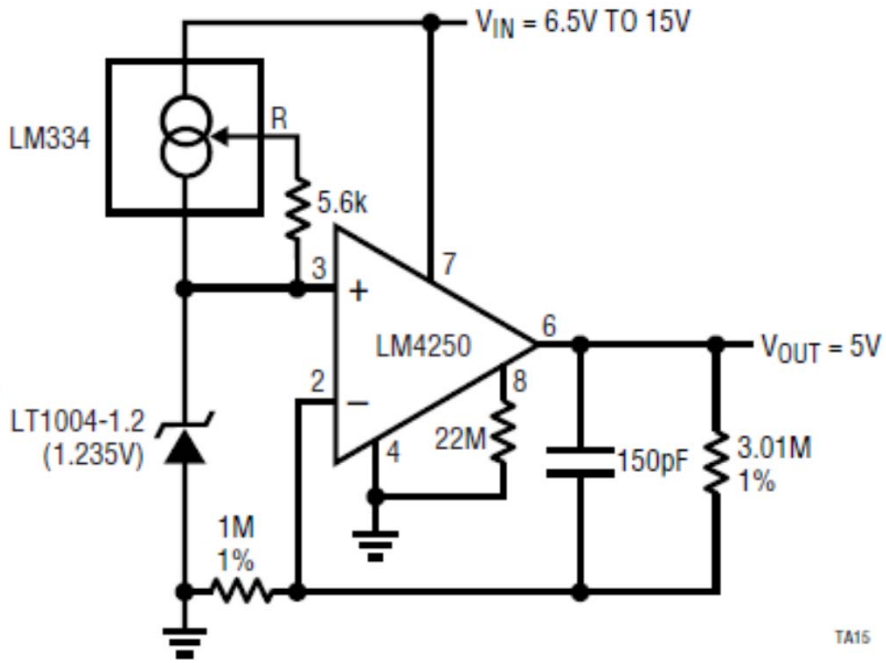
- افزایش مقاومت خروجی



- افزایش جریان خروجی

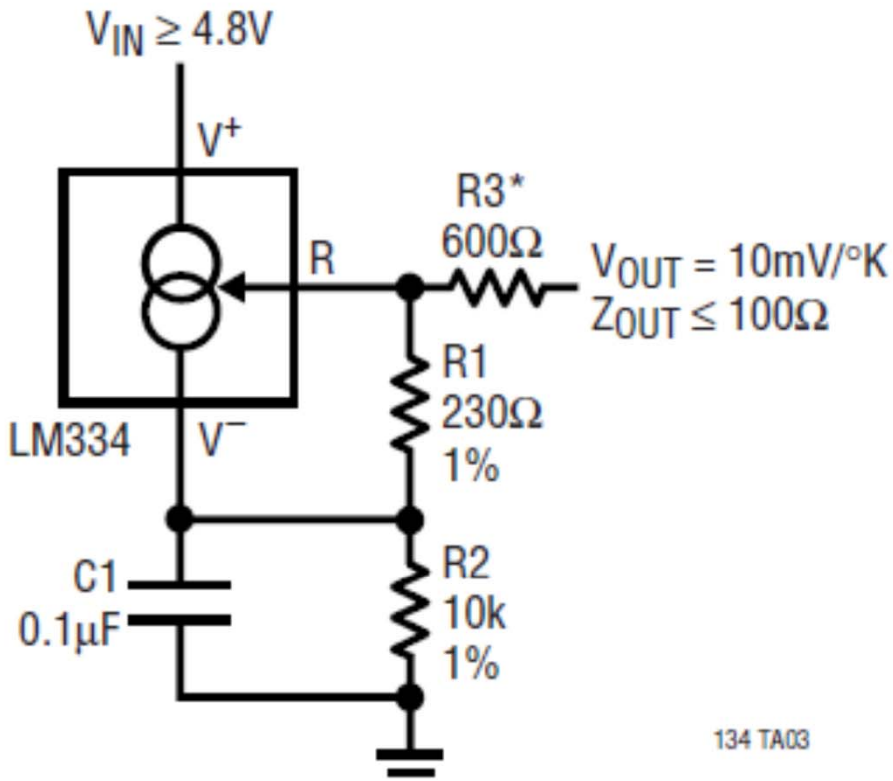
نمونه کاربردهای LM134

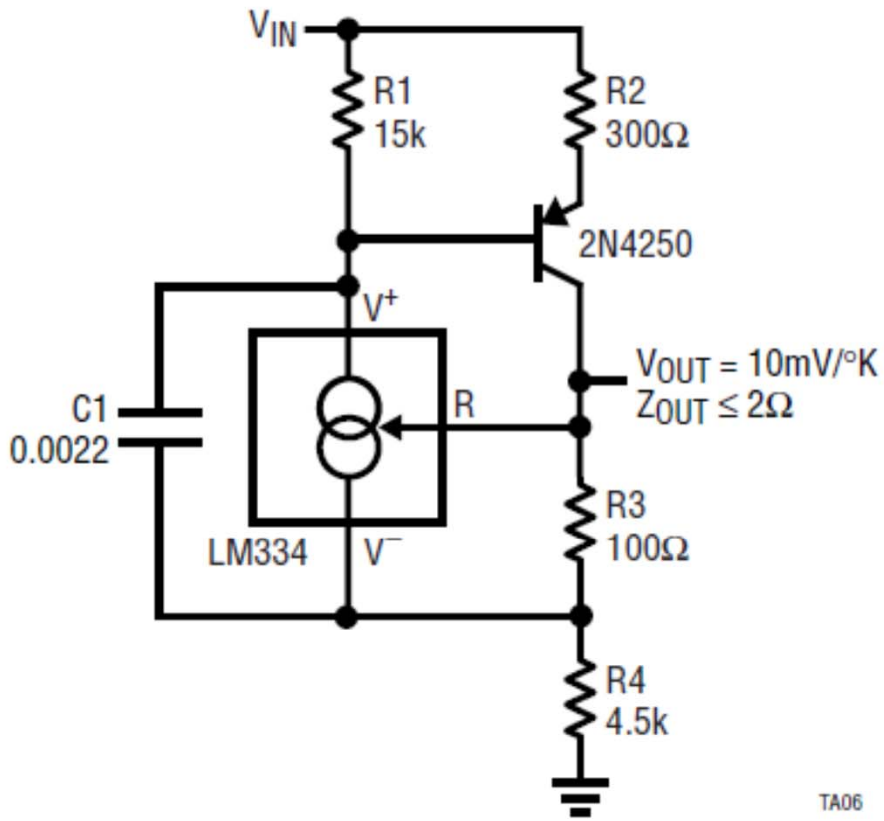




- باياس مرجع ولتاژ
- منبع جریان بسیار پایین

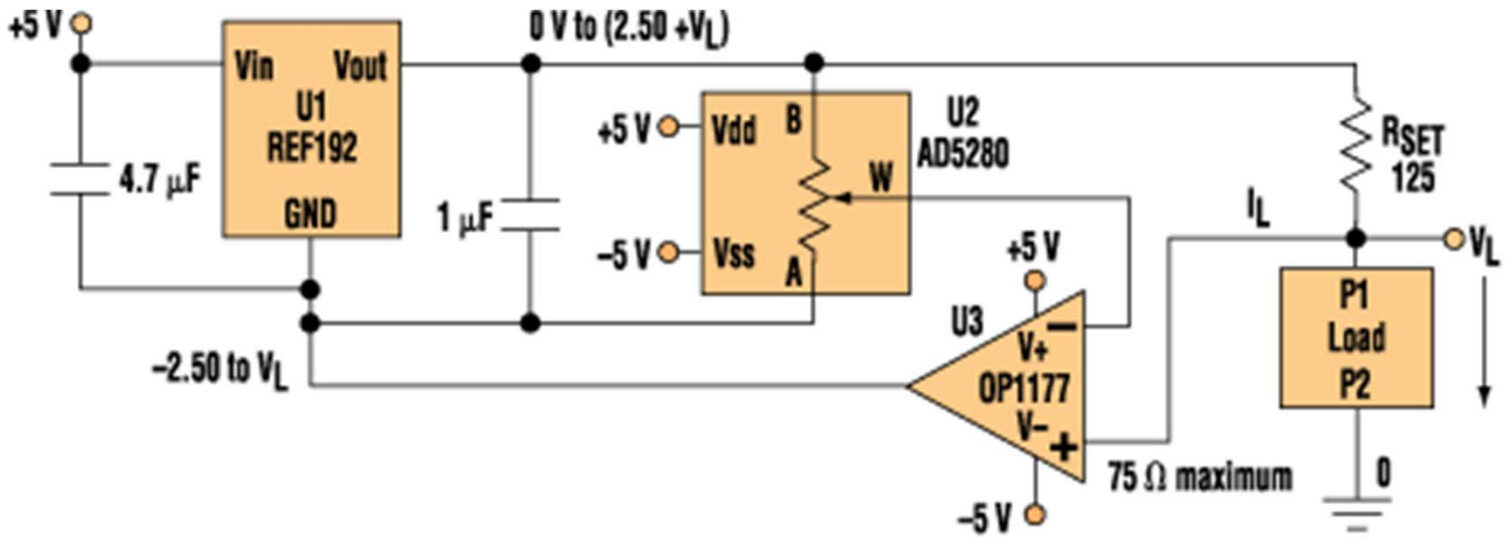
نمونه کاربردهای LM134





- دما سنج دقیق: به علت جریان PTAT

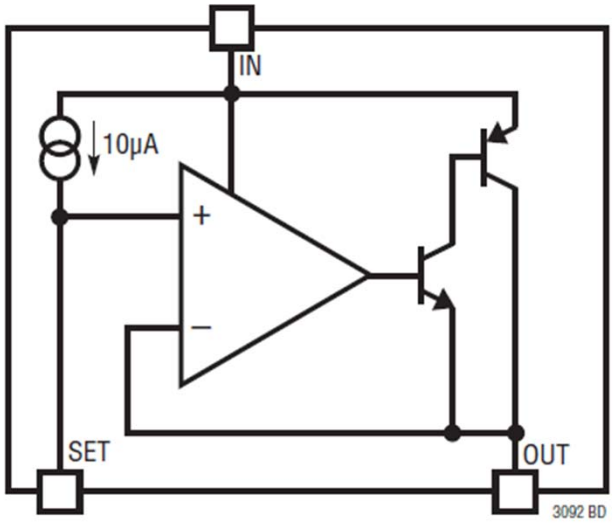
برخی روشهای متنوع ساخت منبع جریان

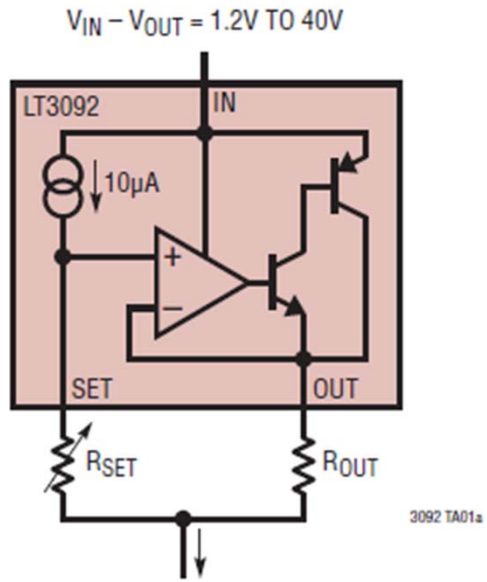


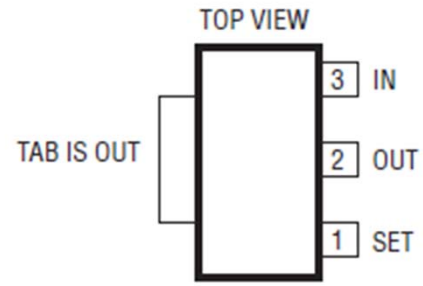
1. This precision 0- to 20-mA programmable current source uses a digital potentiometer (U2) to control the voltage-divider ratio of the reference voltage.

- استفاده از پتانسیومتر دیجیتال و مرجع ولتاژ

منبع جریان LT3092



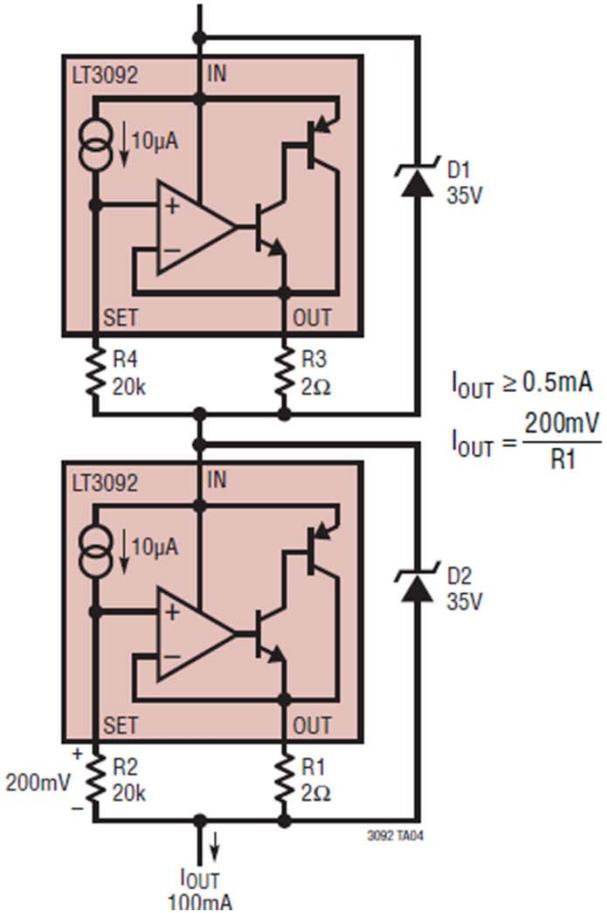




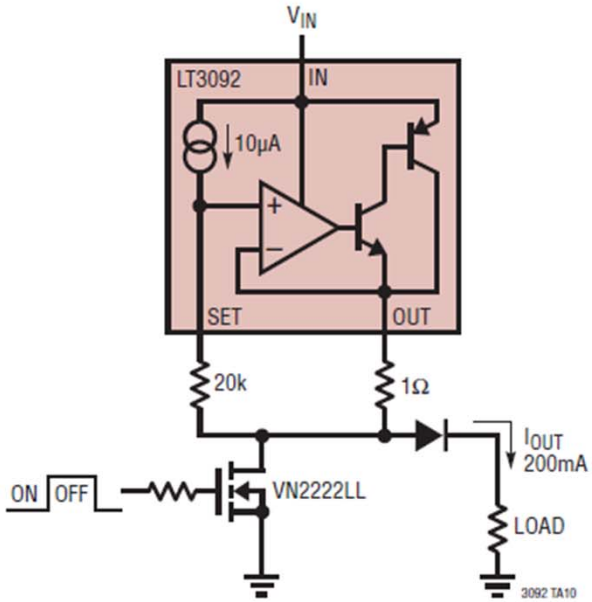
$$I_{SOURCE} = 10\mu A \cdot \frac{R_{SET}}{R_{OUT}}$$

- منبع جریان داخلی 10uA
- جریان خروجی 10uA تا 200mA
- دقت مطلق 1%
- ولتاژ قابل تحمل: 40V

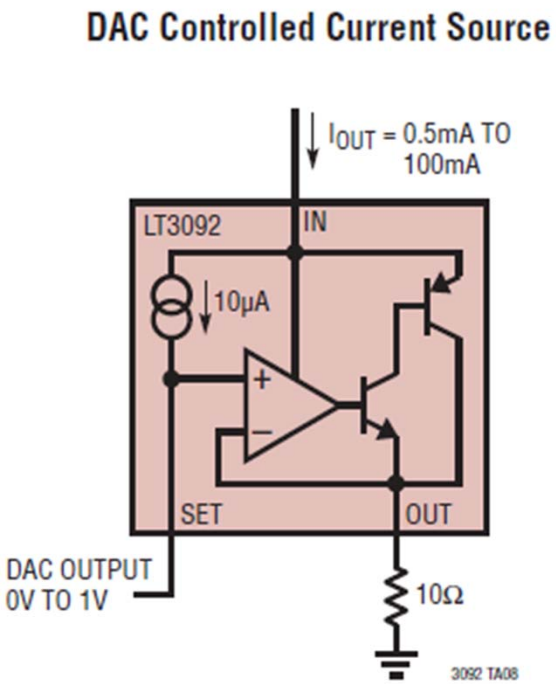
منبع جریان LT3092: برخی مدارات کاربردی



- سری: افزایش ولتاژ قابل تحمل

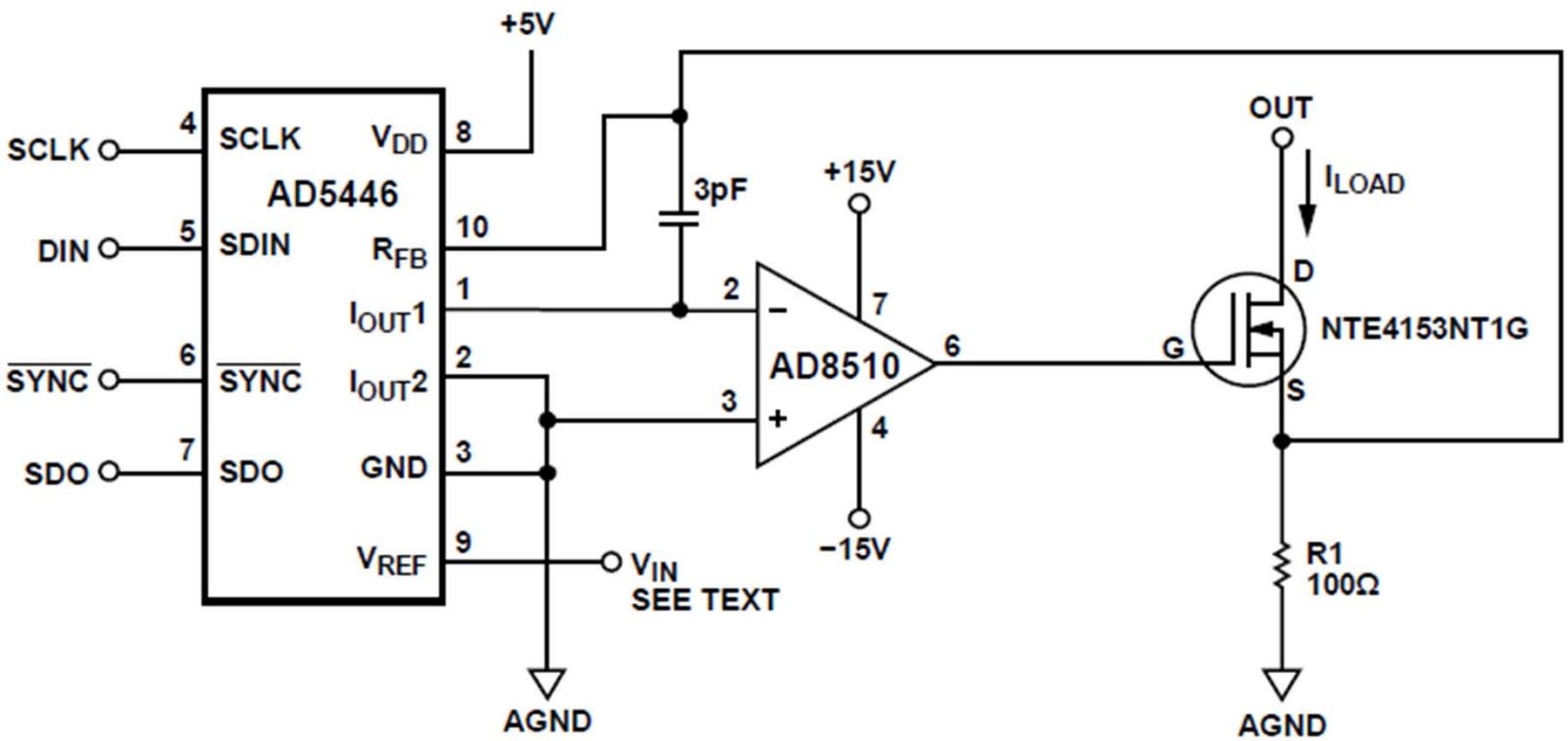


- منبع جریان پالسی



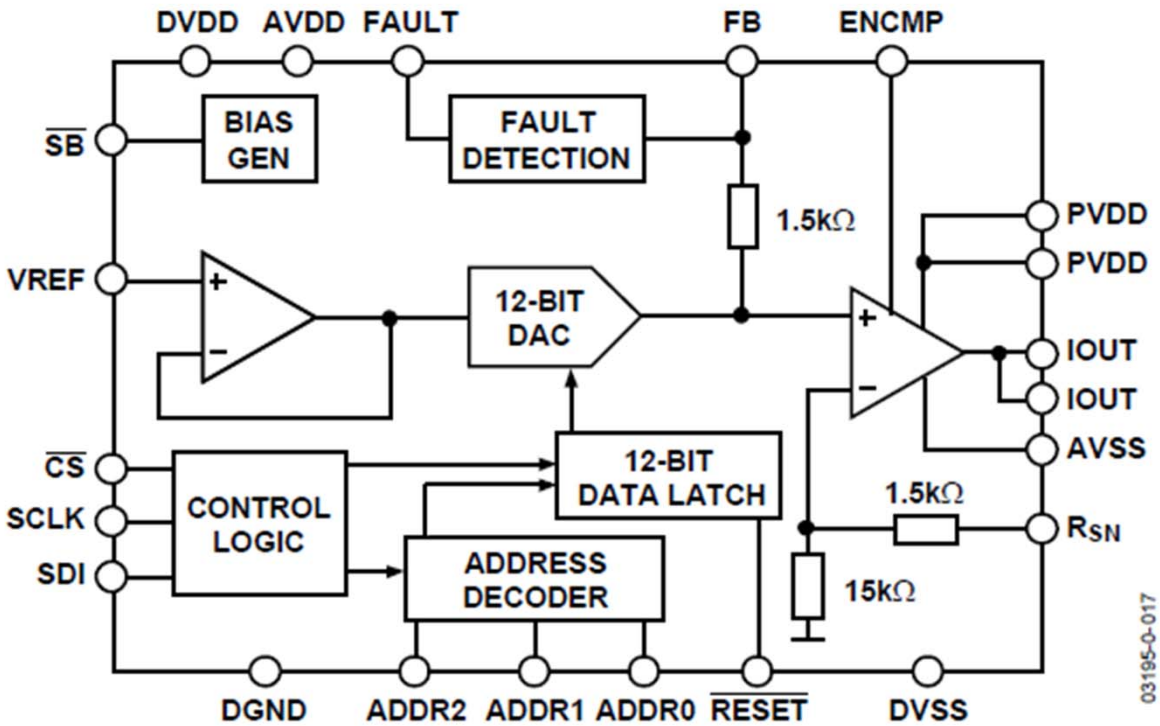
- کنترل با DAC

ترکیب DAC و مبدل جریان به ولتاژ



؟ •

IC یکپارچه منبع جریان دیجیتال



- ADN8810

$$I_{OUT} = Code \times \frac{V_{REF}}{4096} \times \frac{1}{R_{SN}} \times \left(\frac{R_{SN}}{15k} + 0.1\right)$$

- جریان خروجی 0 تا 300mA
- DAC 12 بیت