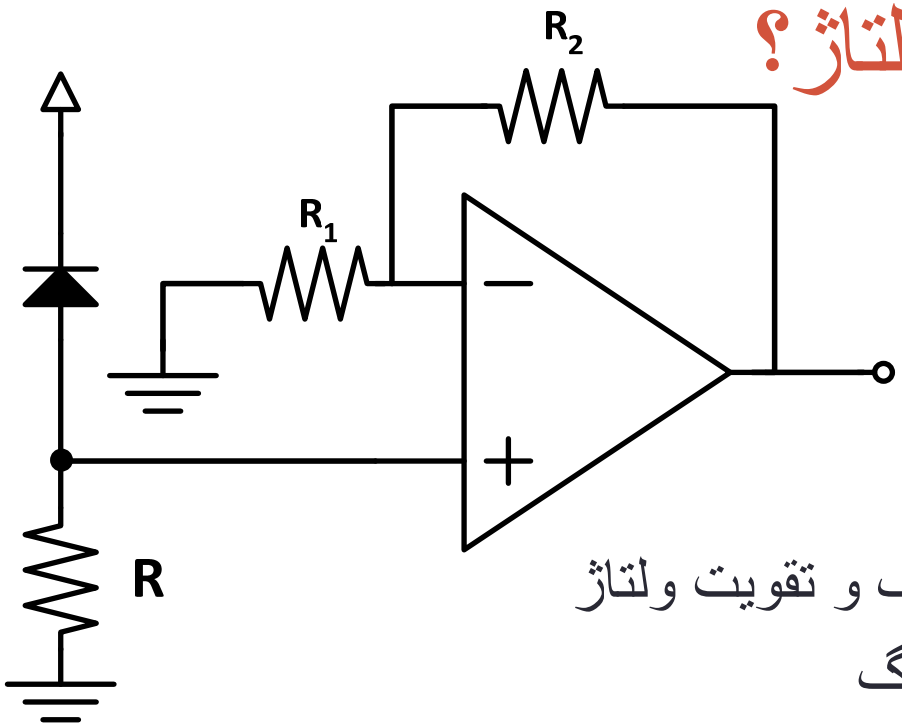
مدارات واسط سنسورها (2)

ابزاردقیق پیشرفته الکترونیکی

مدارهای واسط سنسورهای جریان و بار

- مبدل جریان به ولتاژ تررسانا
- مدار سنسور اثر هال
- اندازه گیری جریان های AC با ترانس
- تقویت کننده های بار الکتریکی

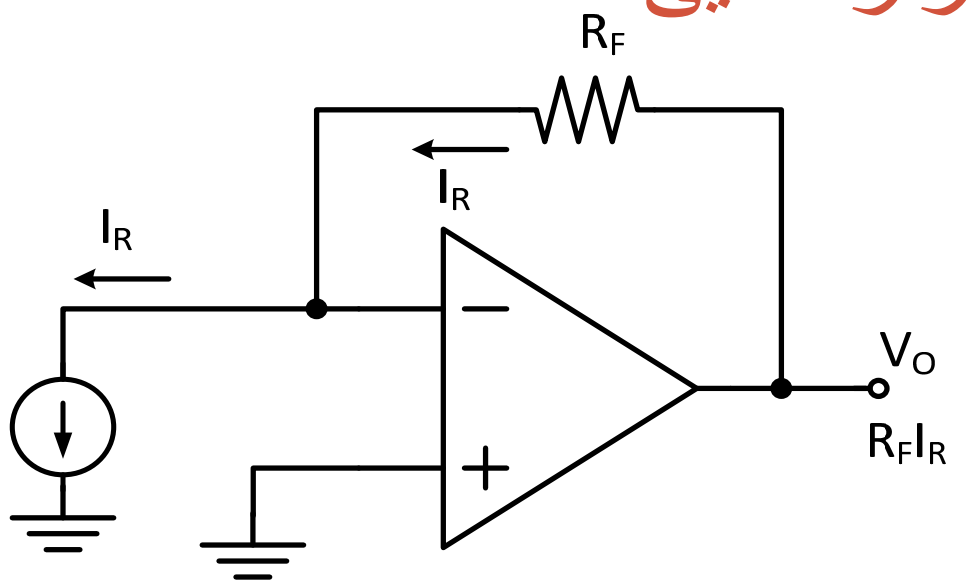
استفاده از تقویت کننده ولتاژ؟



- تبدیل جریان به ولتاژ با مقاومت بزرگ و تقویت ولتاژ

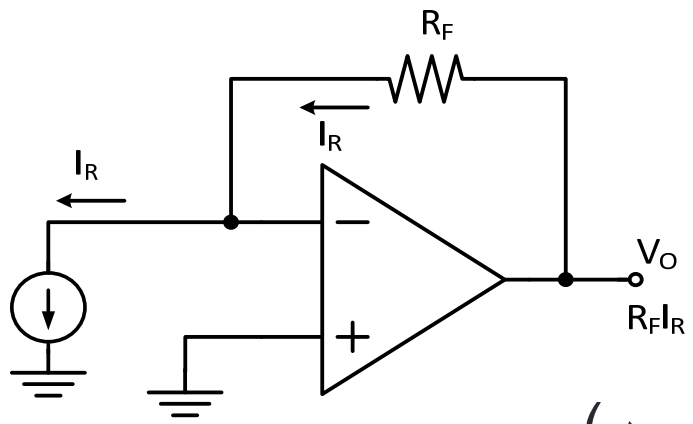
- تبدیل جریان به ولتاژ با مقاومت بزرگ و تقویت ولتاژ
- جریان کم: نیاز به مقاومت بسیار بزرگ
  - نویز ورودی «ولتاژ» بزرگ
- محدودیت عرض باند ناشی از مقاومت سری و خازن پارازیتی دیود
- تغییرات ولتاژ بر روی دیود:
  - تغییر خازن و غیر خطی شدن ولتاژ نسبت به جریان
- حساسیت به امپدانس (خازن و مقاومت) آپ-امپ ورودی

تقویت کننده ترارسانایی



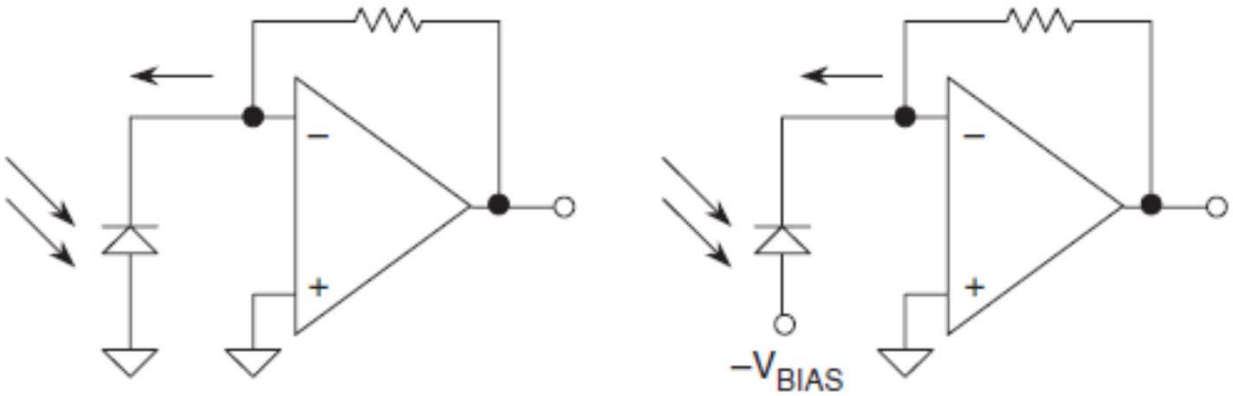
- مناسب برای سنسور های خروجی جریان با امپدانس بالا
  - دیود های نوری
  - تیوب فتومالتی پلایر
  - سنسورهای پیزو الکتریک
  - سلول های الکتروشیمیایی

تقویت کننده ترارسانایی: یادآوری



- جریان بایاس-آفست آپ امپ
  - مقاومت پایه مثبت
  - استفاده از آپ-امپ مناسب
- ناپایداری ناشی از خازن پایه منفی (آپ-امپ و سنسور)
  - استفاده از خازن موازی با مقاومت فیدبک
- نویز آپ-امپ
  - استفاده از اپ-امپ با نویز جریان کم و در نظر گرفتن نویز ولتاژ در محاسبات
  - استفاده از طبقه ورودی ترانزیستوری
- جریان نشتی بورد و عناصر
  - استفاده از حلقه محافظ دور پایه منفی در pcb
  - استفاده از خازنهای با جریان نشتی کم

حالتهای کاری فتودیود



PHOTOVOLTAIC
- Zero Bias
- No “Dark” Current
- Linear
- Low Noise (Johnson)
- Precision Applications

PHOTOCONDUCTIVE
- Reverse Bias
- Has “Dark” Current
- Nonlinear
- Higher Noise (Johnson + Shot)
- High Speed Applications

- بایاس صفر(PV): جریان تاریکی صفر، خطی، نویز کمتر
- بایاس معکوس (PC): سرعت بالاتر، نویز بالاتر، جریان تاریکی غیر صفر

تقویت کننده ترارسانایی: برخی نکات باقی مانده

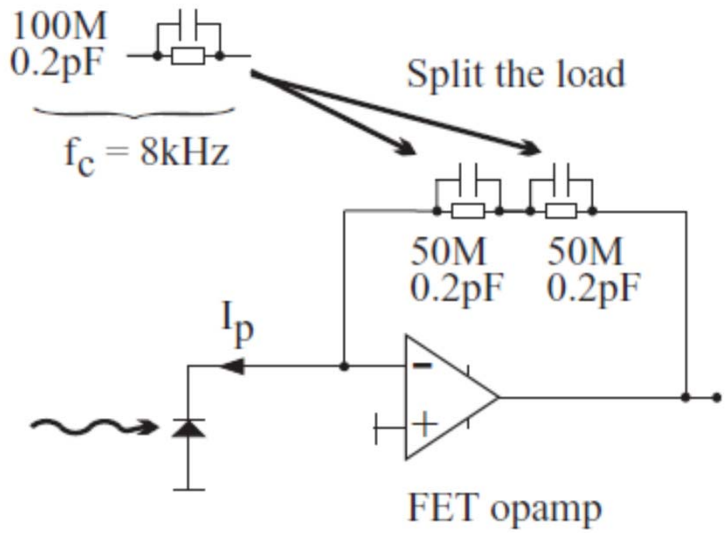
- نیاز به بهره جریان-ولتاژ بسیار بزرگ
- تغییرات زیاد مقاومت خروجی سنسور
- کاربرد های با عرض باند وسیع
- مثال های طراحی در مقالات

تقویت کننده ترارسانایی با بهره بسیار بزرگ

- افزایش مقاومت فیدبک: تقویت جریان 1nA به 1V: R_F=1GΩ
  - امکان عدم دسترسی آسان به مقاومتهای بسیار بالا(اکسید فلزی-بدنه شیشه ای)
  - تاثیر مقاومتهای پارازیتی (مقاومت بورد) در بهره: عدم دقت

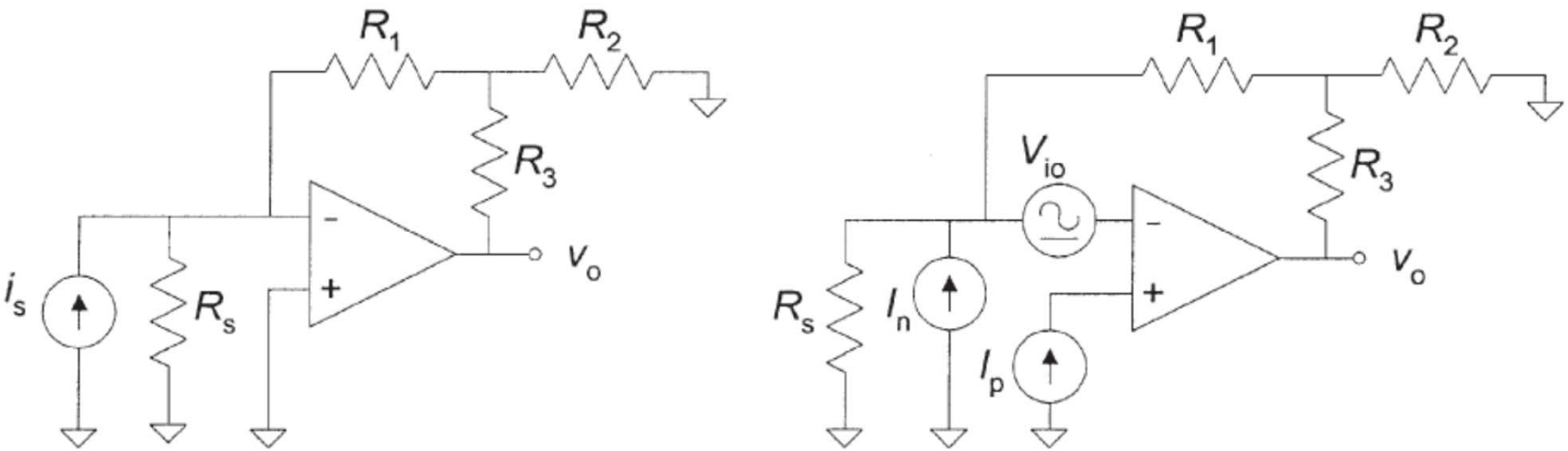
- مقاومت PBC:
  - FR4 کاملا تمیز در دمای اتاق: حدود 10^{13}Ω/□
  - کاهش قابل ملاحظه مقاومت در صورت وجود آلودگی
    - رطوبت، اثر انگشت، چربی پوست، روغن لحیم، ذرات گرد و خاک ...
  - کاهش قابل ملاحظه مقاومت با افزایش دما (نمایی)
- اضافه کردن طبقه بهره ولتاژ(مثال استفاده از RF=20MΩ و بهره ولتاژ50)
  - افزایش نسبت سیگنال به نویز و نیاز به تقویت کننده ولتاژ دقیق وکم نویز

برخی روشهای تولید مقاومت بزرگ؟



- سری کردن مقاومتها
- کاهش خازن پارازیتی موازی با مقاومتها
- استفاده از ترانزیستور؟

تقویت کننده ترارسانایی با بهره بسیار بزرگ



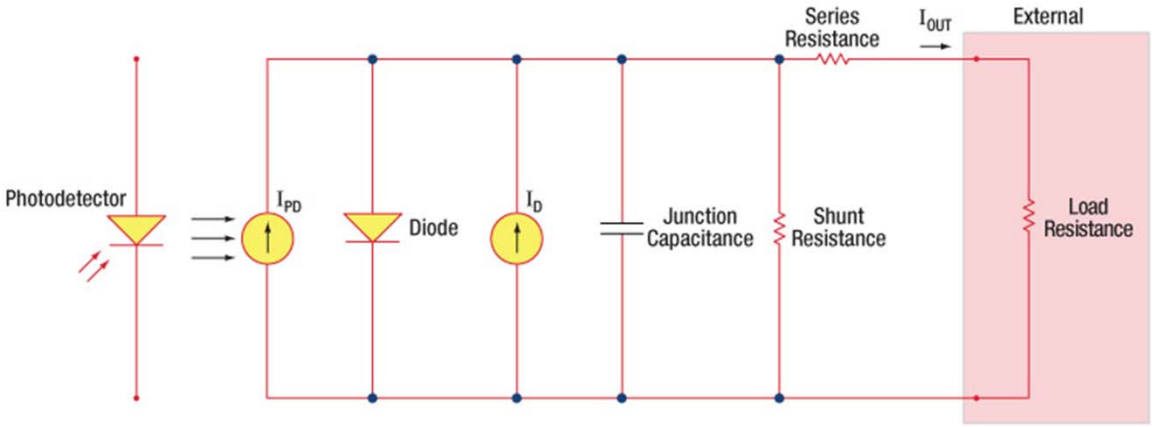
- استفاده از مدار فیدبک شبکه T: امکان دستیابی به ترارسانایی بزرگ با مقاومتهای کوچکتر

$$Z_T(f \ll f_H) = R_3 + R_1\left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right)$$

- افزایش بهره نویز: تاثیر قابل ملاحظه ولتاژ نویز و آفست در خروجی

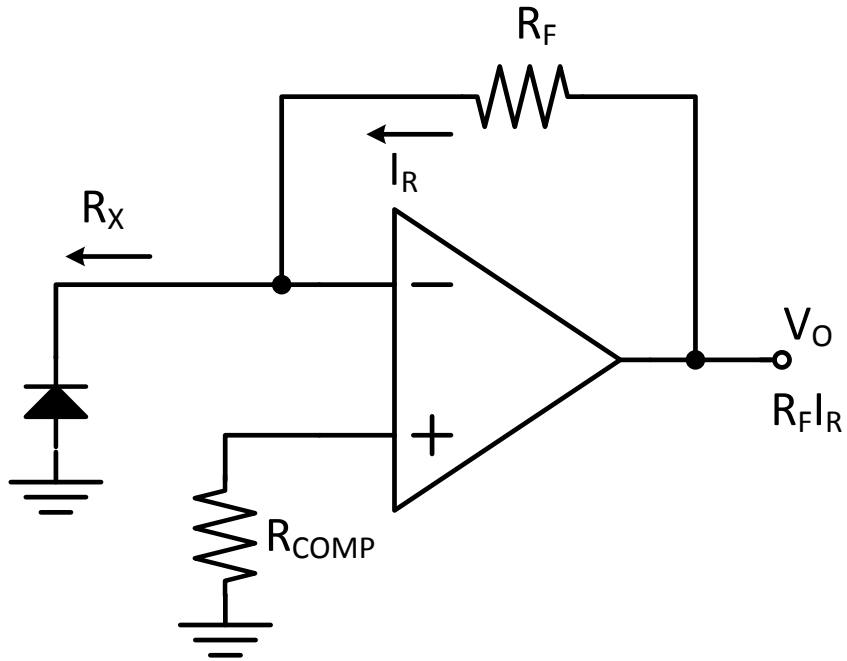
$$\mathrm{OZE} = I_n\left[R_3 + R_1\left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right)\right] + V_{io}\left[1 + \frac{R_1}{R_s} + \frac{R_3}{R_2}\right]$$

بررسی مدار معادل فتودیود



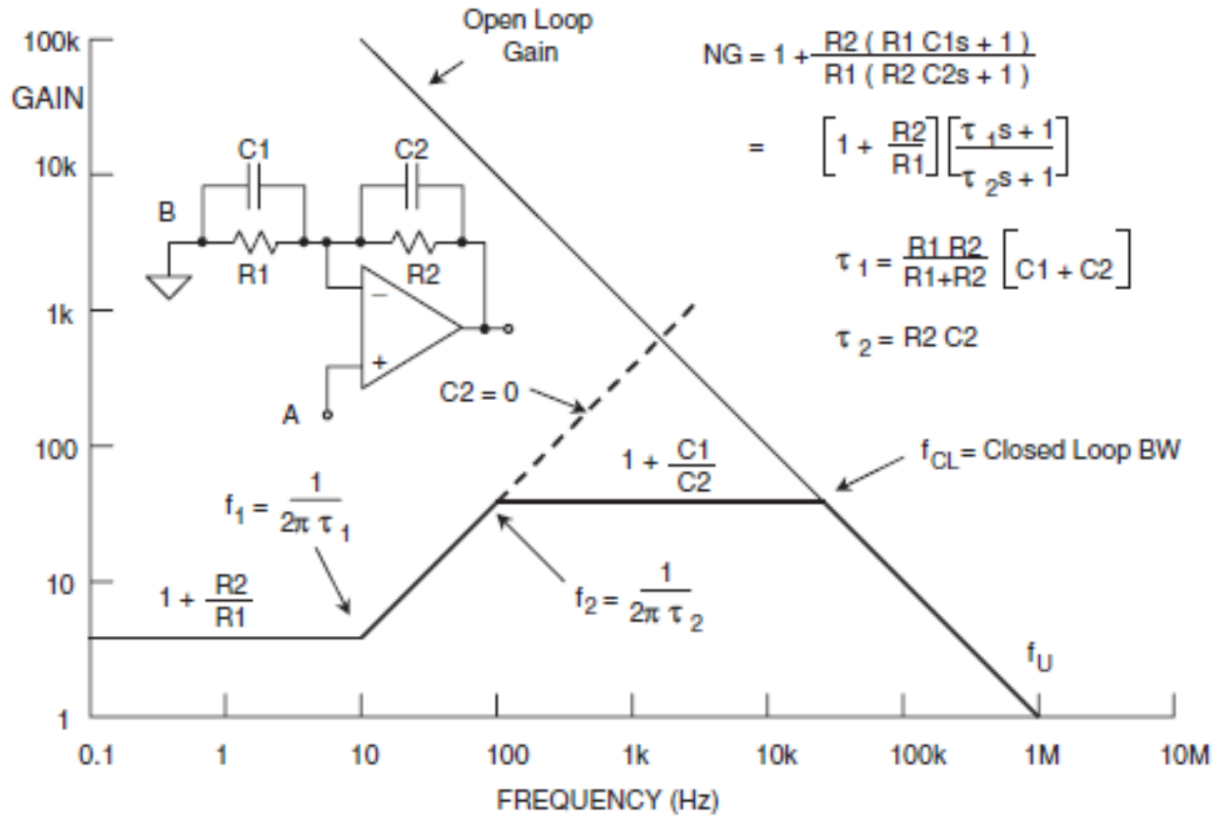
- خازن پارازیتی پیوند PN:
  - افزایش ناپایداری مدار و کاهش سرعت افزایش نویز
  - متغیر با ولتاژ بایاس
- مقاومت موازی سنسور
  - افزایش بهره نویز و کاهش اثر خنثی سازی جریان بایاس آپ-امپ
  - شدیدا متغیر با دما
  - نصف شدن مقاومت به ازای 10^{oC} افزایش در حالت photo-conductive و به ازای هر 6^{oC}در حالت PV
  - $R=30M\Omega$ @75^{oC} ← $R=1000M\Omega$ @ 25^{oC}

تاثیر تغییر مقاومت (جریان) فتودیود با دما



- تاثیر DC:
- استفاده از مقاومت R_{COMP} جهت کاهش اثر جریان بایاس: $R_{COMP}=R_F||R_X$
- R_X متغیر، اگر $R_X>>R_F$ در اینصورت: $R_{COMP}\approx R_F$
- R_X متغیر با دما: $R_X<R_F$: خطای قابل ملاحظه ناشی از R_{COMP}
- عدم استفاده از مقاومت R_{COMP} در صورت امکان اتفاق خطا

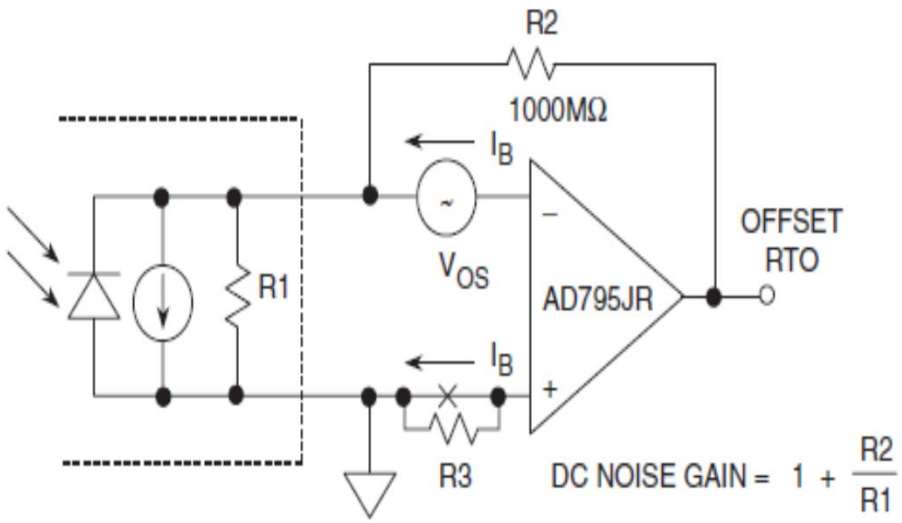
تاثیر تغییر مقاومت (جریان) فتودیود با دما



- تاثیر بر بهره نویز: افزایش بهره نویز ولتاژ اپ-امپ: افزایش سهم ولتاژ نویز
-

تاثیر تغییر مقاومت (جریان) فتودیود با دما

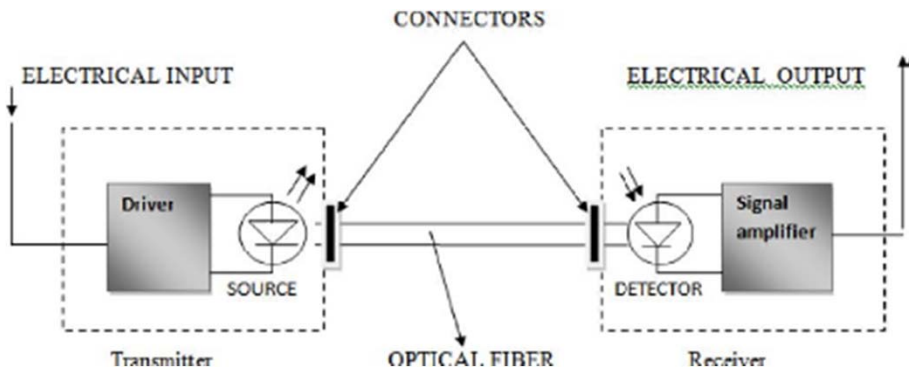
- مثال



- I_B DOUBLES EVERY 10°C TEMPERATURE RISE
- R1 = 1000MΩ@ 25°C (DIODE SHUNT RESISTANCE)
- R1 HALVES EVERY 10°C TEMPERATURE RISE
- R3 CANCELLATION RESISTOR NOT EFFECTIVE

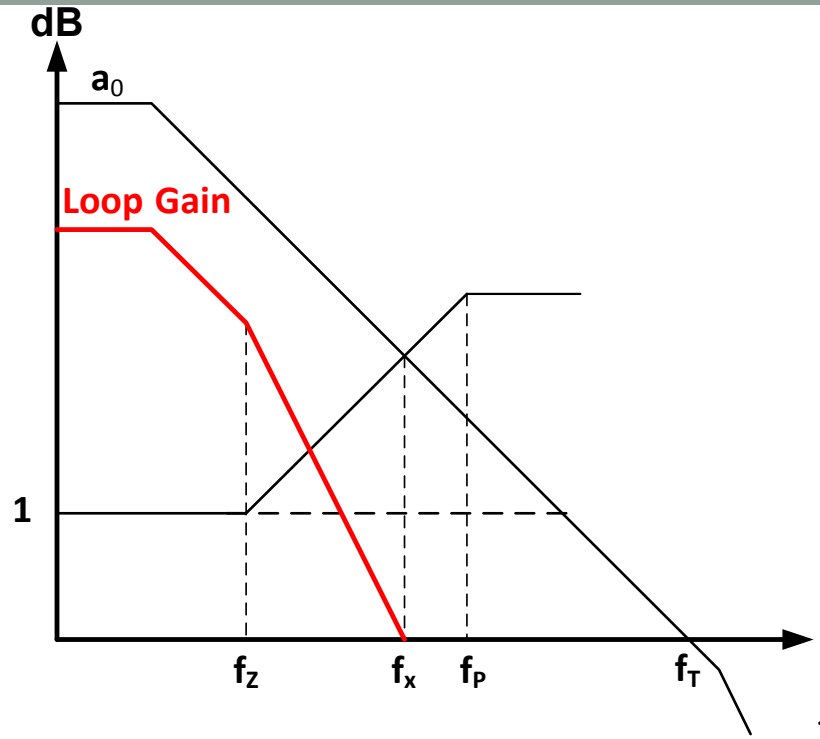
	0°C	25°C	50°C	70°C
V_{OS}	0.575mV	0.500mV	0.575mV	0.635mV
Noise Gain	1.1	2	7	24
V_{OS} Error RTO	0.6mV	1.0mV	4.0mV	15.2mV
I_B	0.6pA	3.0pA	18.0pA	72.0pA
I_B Error RTO	0.6mV	3.0mV	18.0mV	72.0mV
Total Error RTO	1.2mV	4.0mV	22.0mV	87.2mV

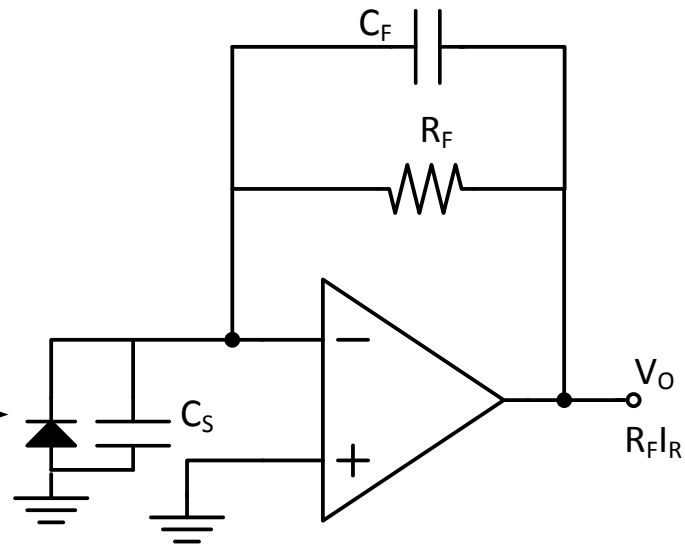
طراحی برای عرض باند وسیع



- برخی کاربرد ها:
  - انتقال داده (فیبر نوری) و سایر لینک های نوری (Optical link)
  - فاصله یاب و سرعت سنج (LIDAR)
- معمولا خروجی دیجیتال (عدم نیاز به دقت و خطی بودن زیاد)
- توان سیگنال های ورودی نسبتا بالا: بهره کمتر جریان-ولتاژ مورد نیاز
- معمولا مقاومت موازی سنسور قابل صرفنظر کردن

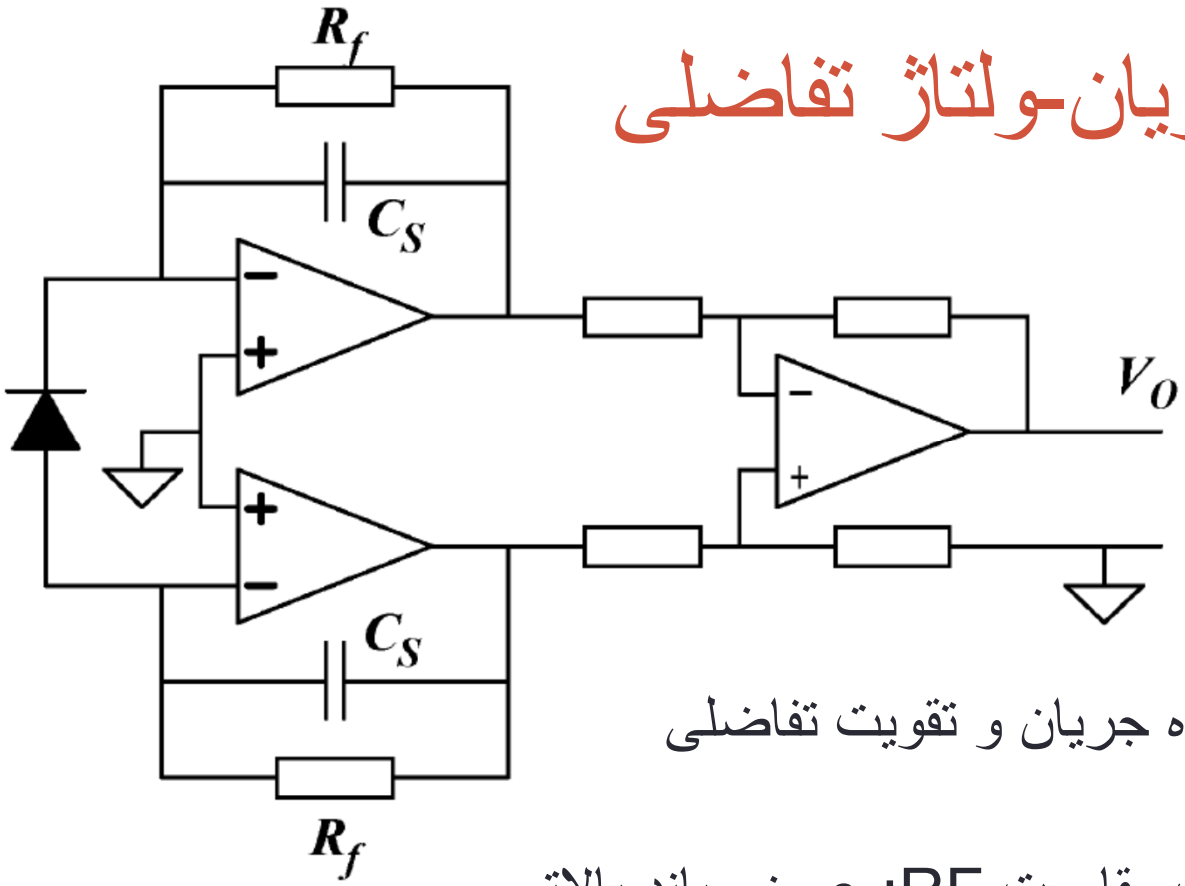
عرض باند تقویت کننده





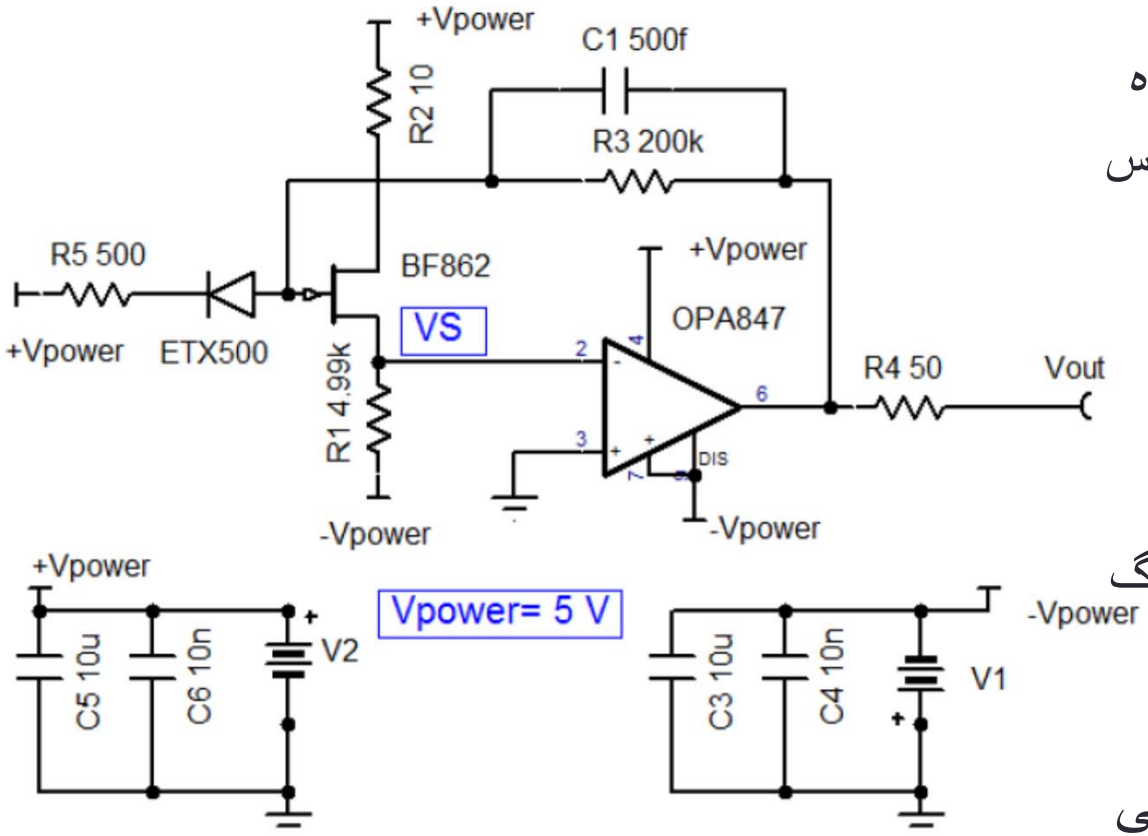
- روابط اصلی:
- $f_Z = \frac{1}{2\pi R_F(C_S+C_F)}$ $\quad f_p = \frac{1}{2\pi R_F C_F}$ $\quad f_X = \sqrt{f_T f_Z}$
- پایداری: برای حاشیه فاز 45 درجه: $f_X=f_P$
- $C_F = \frac{\left(1+\sqrt{8\pi R_F C_S f_T}\right)}{4\pi R_F f_T}$
- نکات اصلی طراحی: f_T آپ-امپ و انتخاب خازن فیدبک مناسب

تقویت کننده جریان-ولتاژ تفاضلی



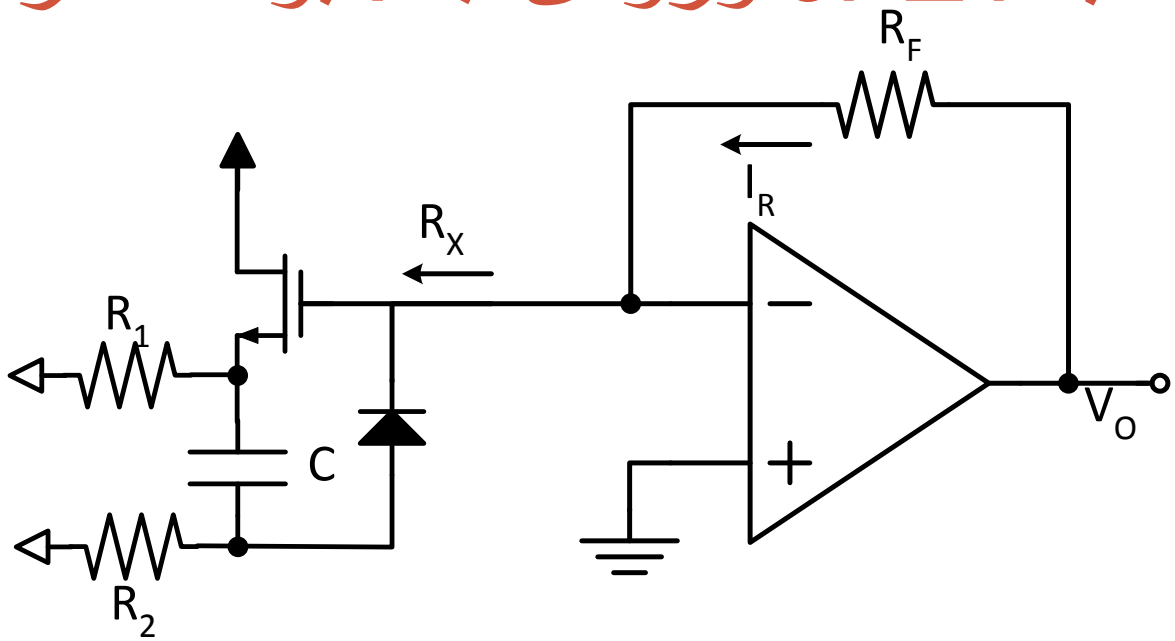
- ترکیب دو تقویت کننده جریان و تقویت تفاضلی
- بهره تفاضلی با نصف مقاومت RF: عرض باند بالاتر
- افزایش 3dB توان نویز ولتاژ
- کاهش نویز جریان فرکانس پایین و افزایش نویز فرکانس بالا
- مقاومت در برابر تداخل در مقایسه با مدار معمول

تقویت کننده با JFET ورودی جدا



- کاهش نویز ولتاژ تقویت کننده
  - در صورت کوچک بودن امپدانس سنسور
- ساختار غیر تفاضلی ورودی
- ولتاژ متغیر بر روی فتودیود
  - کاهش سرعت در صورت بزرگ بودن خازن پارازیتی سنسور
- امکان استفاده از زوج تفاضلی JFET
- امکان بوت-استراپینگ

تقویت کننده با JFET ورودی جدا: بوت-استراپینگ



- کاهش خازن خروجی و افزایش مقاومت خروجی در فتودیودهای با ابعاد بزرگ
  - کاهش نویز و افزایش عرض باند
- $Z_x = R_1||R_2 + \frac{1+g_m(R_1||R_2)}{sC_x}$

تقویت کننده با JFET ورودی جدا: بوت-استراپینگ

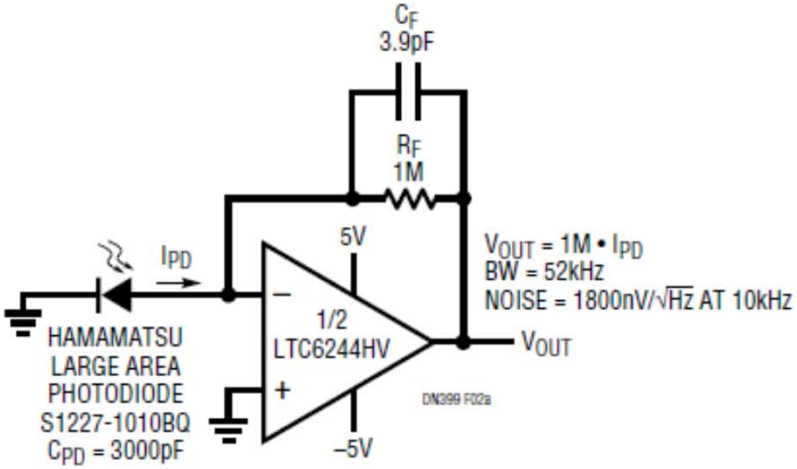


Figure 2a. Large Area Photodiode Transimpedance Amp

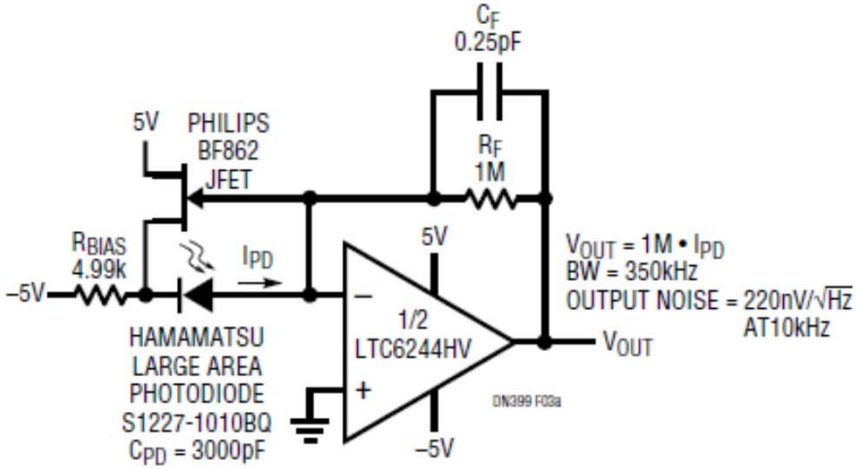
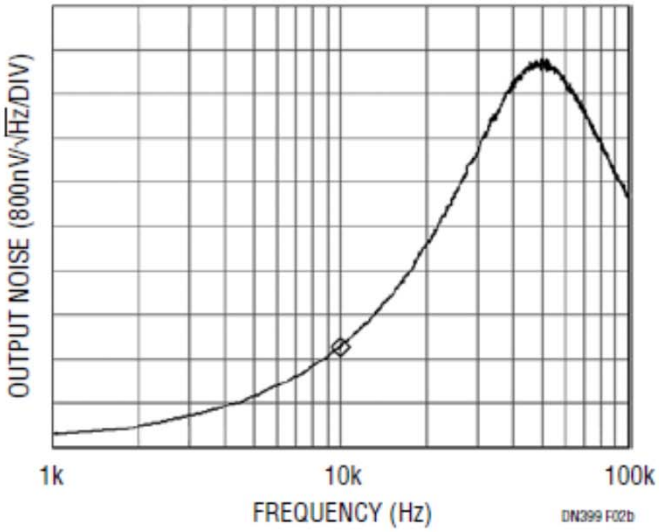
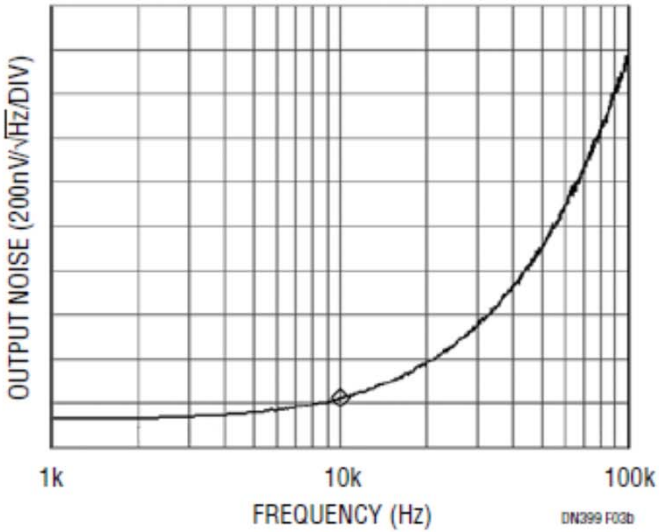
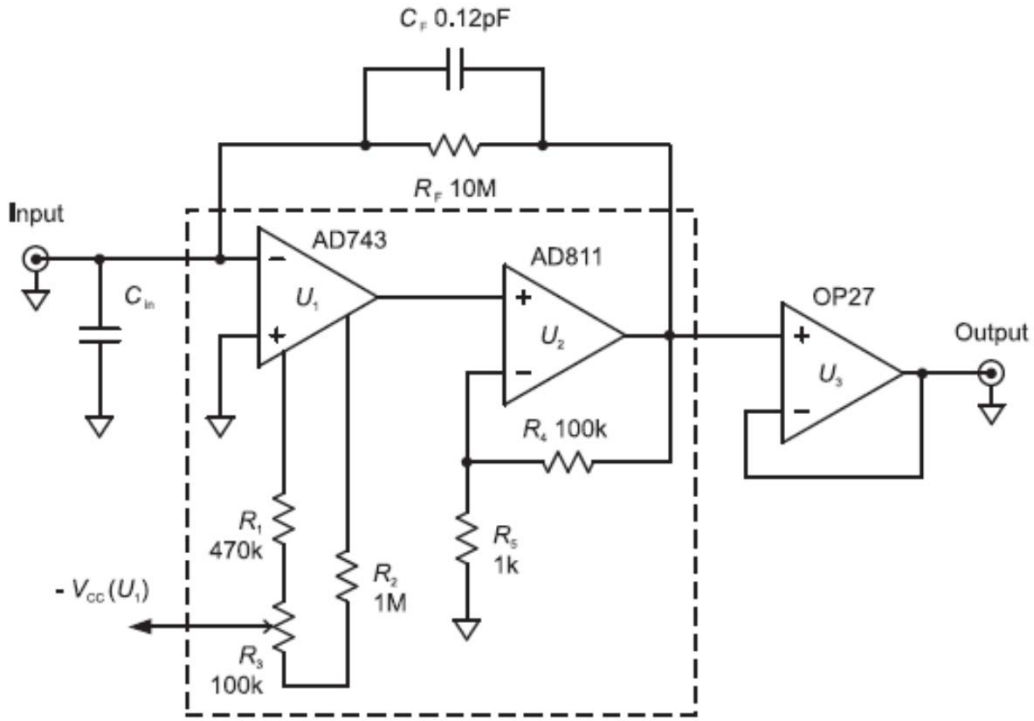


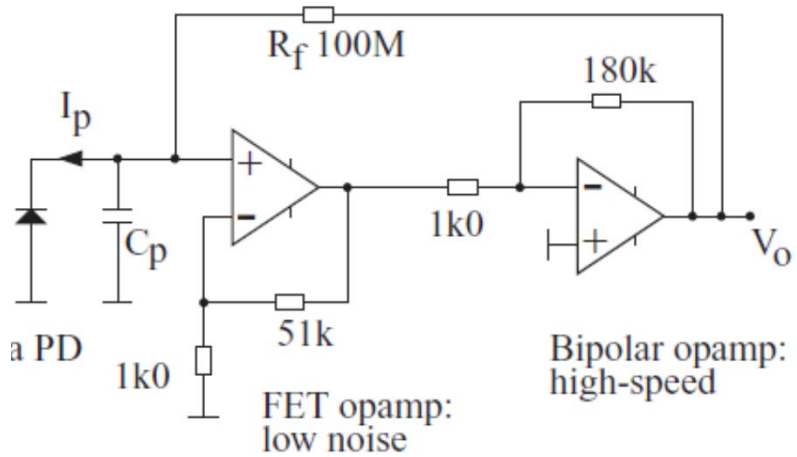
Figure 3a. Large Area Diode Bootstrapping





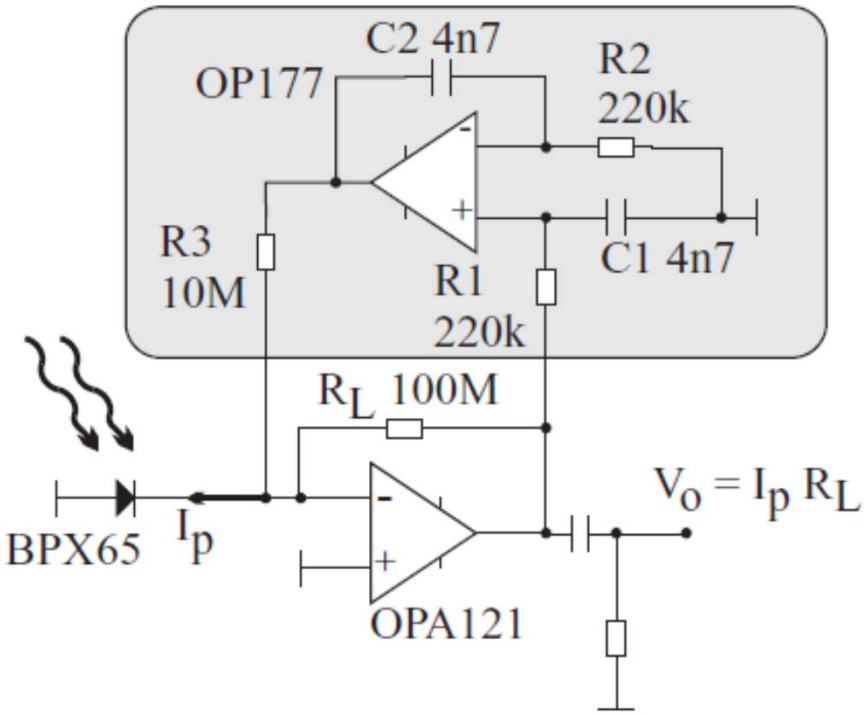
استفاده از تقویت کننده های ترکیبی





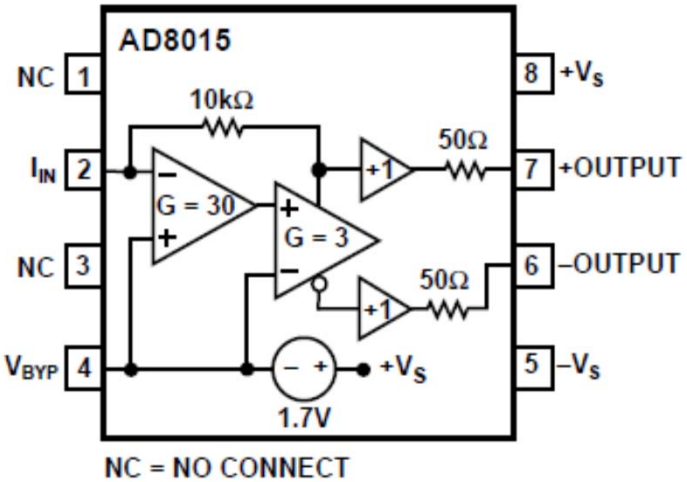
- طبقه اول آپ-امپ JFET با جریان آفست و نویز جریان کم
- طبقه دوم آپ-امپ BJT با عرض باند وسیع و نویز ولتاژ کم
- افزایش قابل ملاحظه UGBW کل

حذف مولفه DC جریان فوتودیود



- کاربرد عمومی: حذف نور محیط
- عدم امکان حذف مستقیم جریان DC در مبدل جریان-ولتاژ
- استفاده از فیدبک از ولتاژ خروجی و اعمال آن به ورودی

نمونه IC تقویت کننده فتودیود



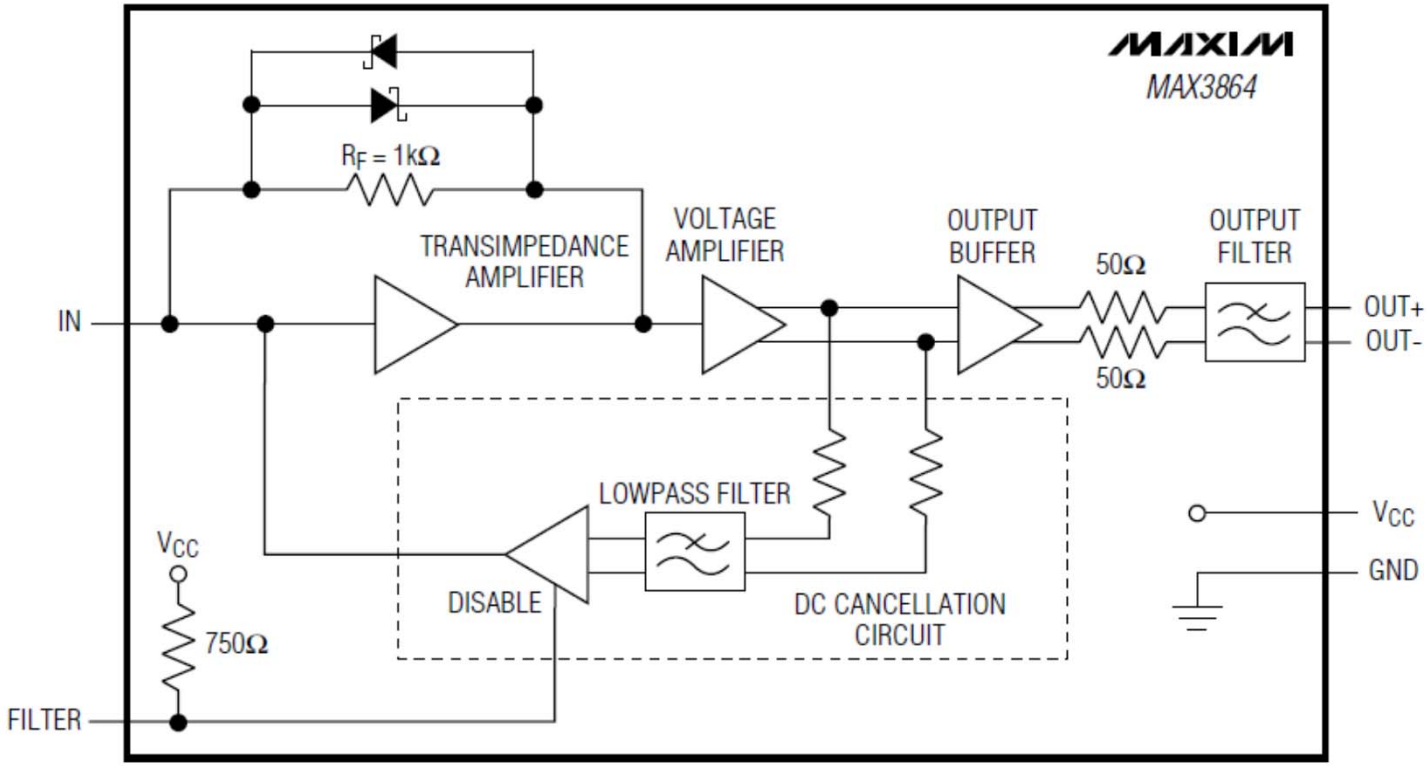
Bandwidth: 240 MHz
Pulse Width Modulation: 500 ps
Rise Time/Fall Time: 1.5 ns
Input Current Noise: 3.0 pA/√Hz @ 100 MHz
Total Input RMS Noise: 26.5 nA to 100 MHz
Wide Dynamic Range
Optical Sensitivity: –36 dBm @ 155.52 Mbps
Peak Input Current: ±350 μA
Differential Outputs
Low Power: 5 V @ 25 mA
Wide Operating Temperature Range: –40°C to +85°C

APPLICATIONS
Fiber Optic Receivers: SONET/SDH, FDDI, Fibre Channel
Stable Operation with High Capacitance Detectors
Low Noise Preamplifiers
Single-Ended to Differential Conversion
I-to-V Converters

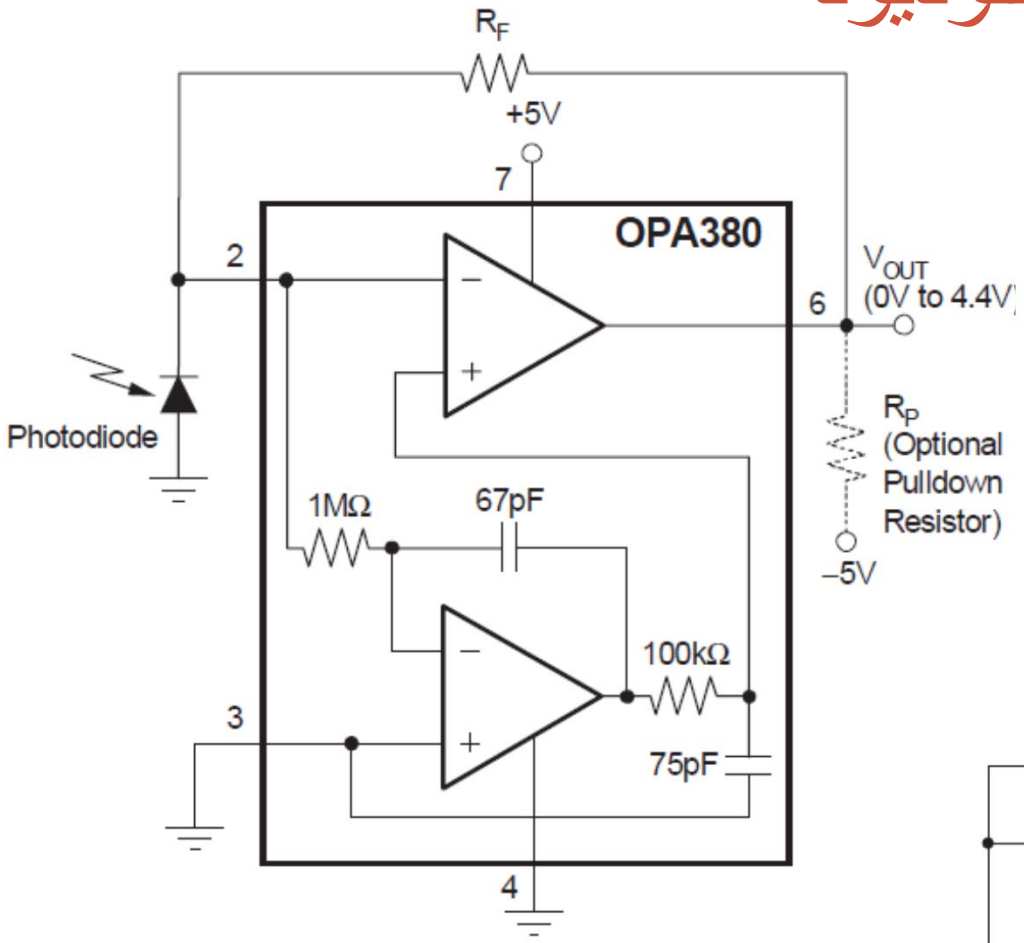
- AD8015: تقویت کننده ترارسانایی با سرعت بالا
- کاربرد فیبر نوری

نمونه IC تقویت کننده فتودیود

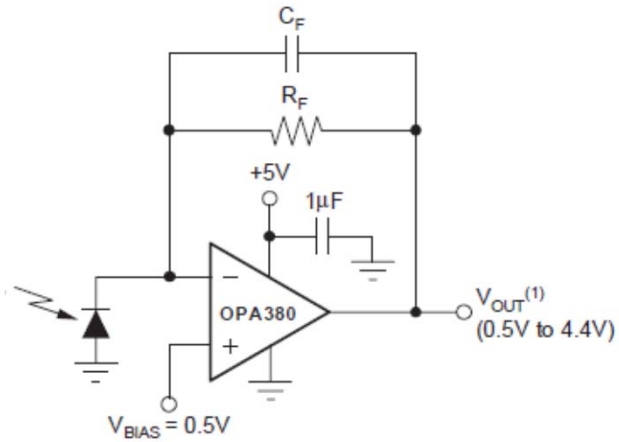
622Mbps, Ultra-Low-Power, 3.3V Transimpedance Preamplifier for SDH/SONET



نمونه IC تقویت کننده فتودیود



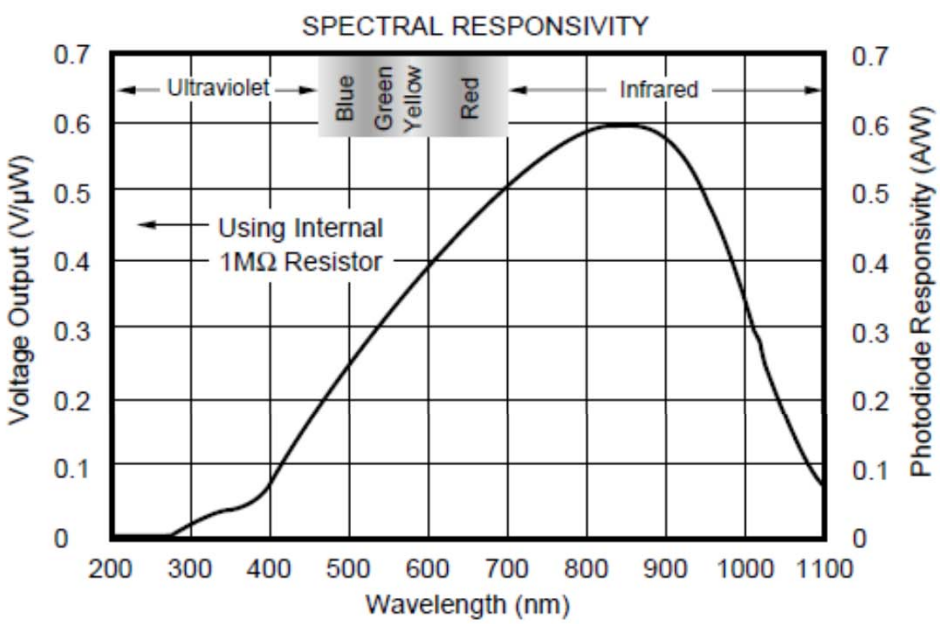
> 1MHz TRANSIMPEDANCE BANDWIDTH
EXCELLENT LONG-TERM V_{OS} STABILITY
BIAS CURRENT: 50pA (max)
OFFSET VOLTAGE: 25µV (max)
DYNAMIC RANGE: 4 to 5 Decades
DRIFT: 0.1µV/°C (max)
GAIN BANDWIDTH: 90MHz
QUIESCENT CURRENT: 7.5mA
SUPPLY RANGE: 2.7V to 5.5V

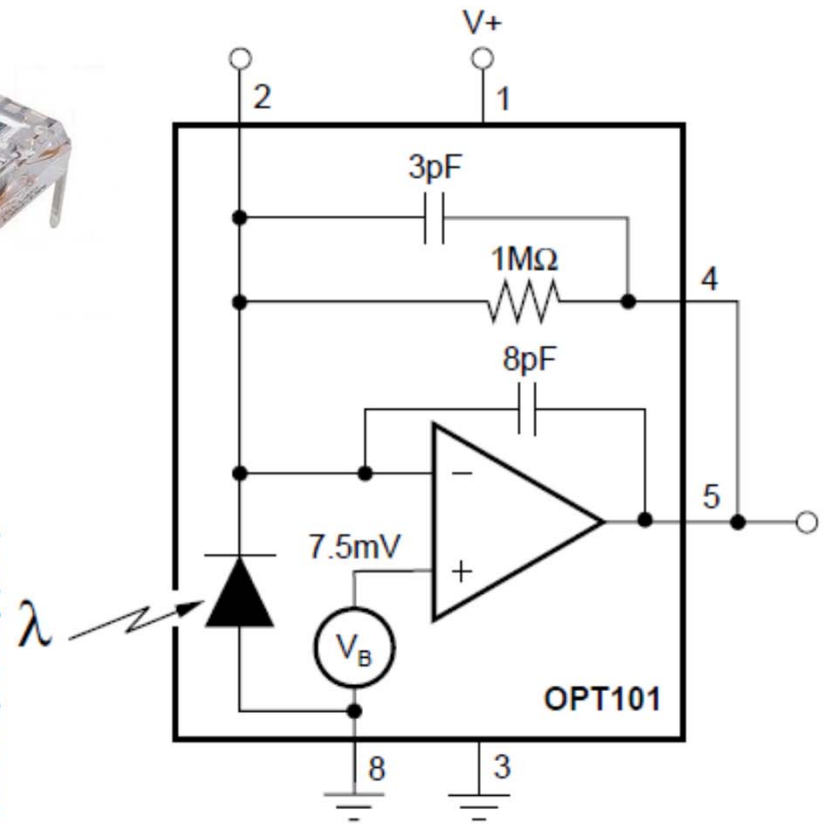


- :OPA380

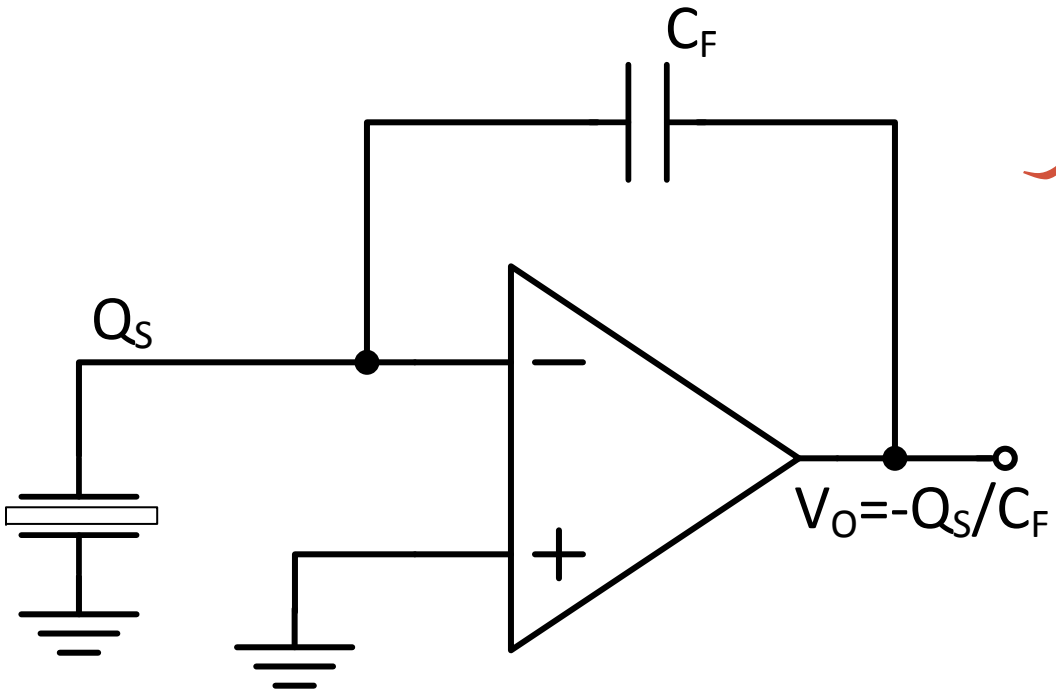
نمونه IC ترکیبی فتودیود و تقویت کننده

- SINGLE SUPPLY: +2.7 to +36V
- PHOTODIODE SIZE: 0.090 x 0.090 inch
- INTERNAL 1MΩ FEEDBACK RESISTOR
- HIGH RESPONSIVITY: 0.45A/W (650nm)
- BANDWIDTH: 14kHz at R_F = 1MΩ
- LOW QUIESCENT CURRENT: 120µA
- AVAILABLE IN 8-PIN DIP AND 8-LEAD SURFACE-MOUNT PACKAGES





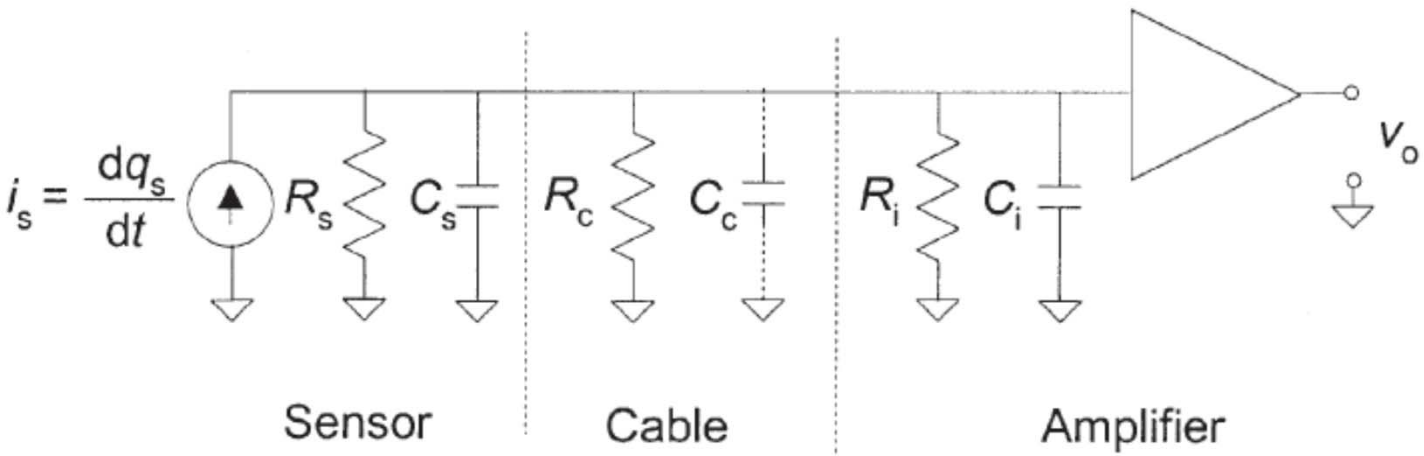
تقویت کننده های بار



- مدار الکترومتر

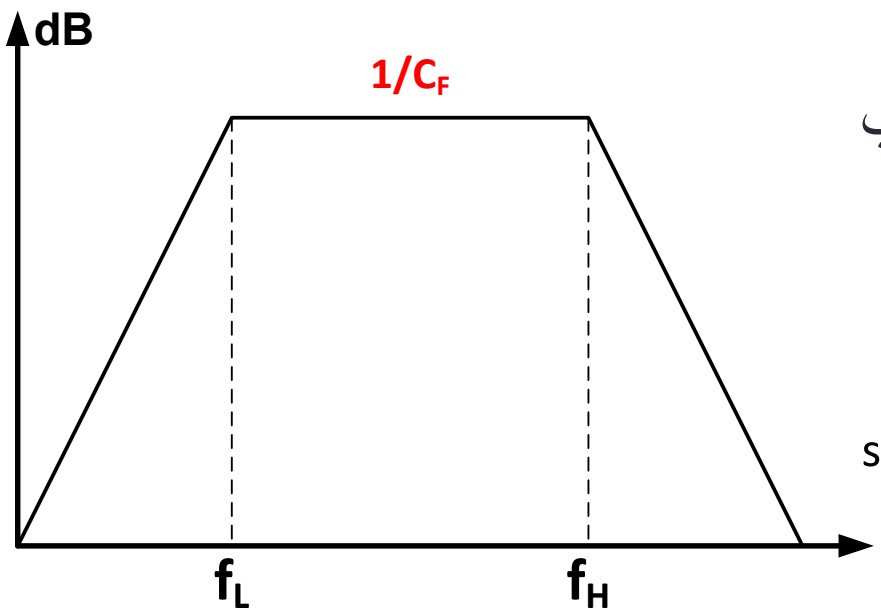
- تبدیل بار الکتریکی به ولتاژ
  - مدار فیدبک خازنی
- سنسور های با خروجی بار الکتریکی
  - سنسور های پیزوالکتریک (شتاب سنج، نیرو سنج، هیدروفون)
- سنسور های photo-conductor با مقاومت خروجی بسیار بزرگ
  - سنسورهای اشعه X تبدیل مستقیم (سلنیم آمورف)
- سنسور های نوری (فوتودیود) با زمان اعمال نور بسیار کوتاه
  - سنسورهای تصویر برداری (نوری، اشعه ایکس)

تقویت کننده های بار: استفاده از تقویت کننده ولتاژ؟

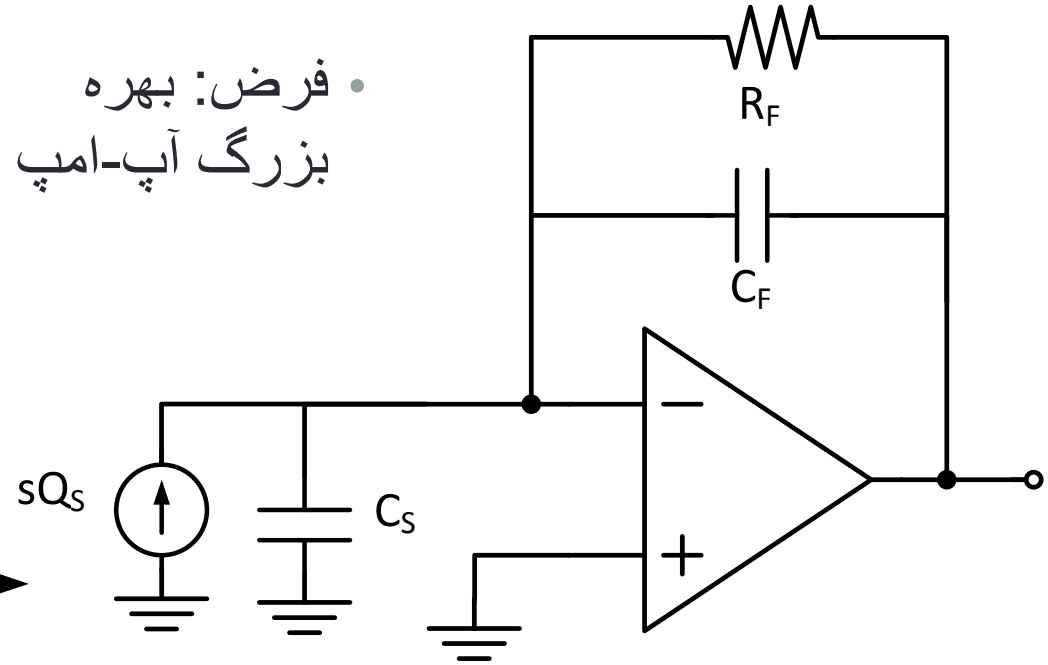


- حساسیت شدید سنسورهای با خروجی بار به خازنهای پارازیتی و مقاومت ورودی تقویت کننده
  - خازن پارازیتی: کاهش بهره و بهره غیر خطی
  - مقاومت ورودی: تخلیه بار خروجی و محدودیت عرض باند سیستم
- برتری مدار الکترومتر به مدار ولتاژی

تقویت کننده های بار: تحلیل ساده



- فرض: بهره بزرگ آپ-امپ

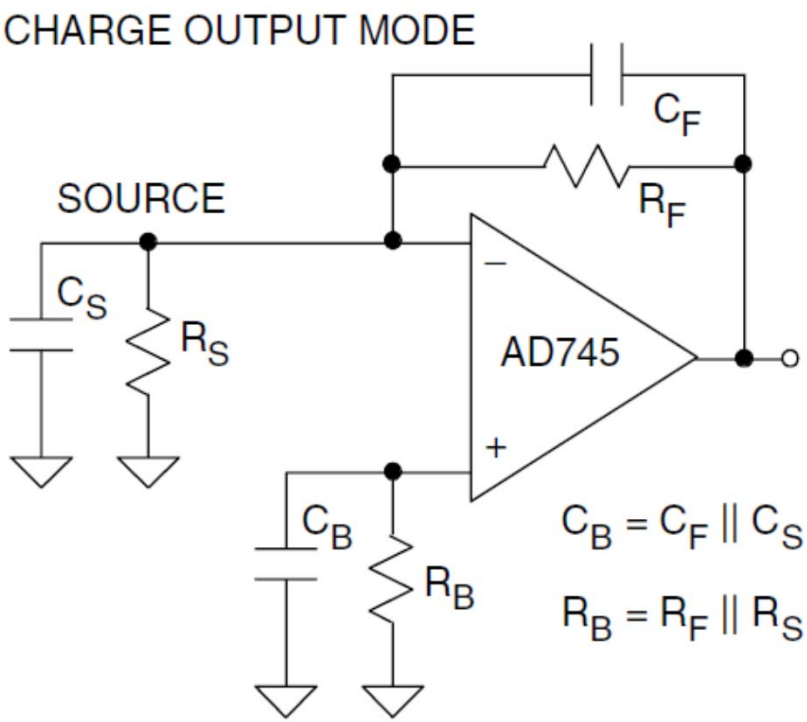


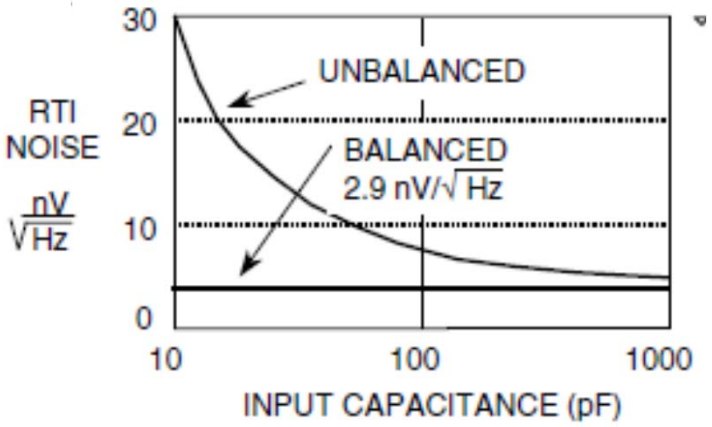
- مشخصه بالا گذر نسبت به بار الکتریکی

$$f_L = \frac{1}{R_F C_F} \qquad f_H = \frac{f_T}{1 + \frac{C_S}{C_F}}$$

- مقاومت R_F: بسیار بزرگ
- استفاده از سوئیچ بجای R_F

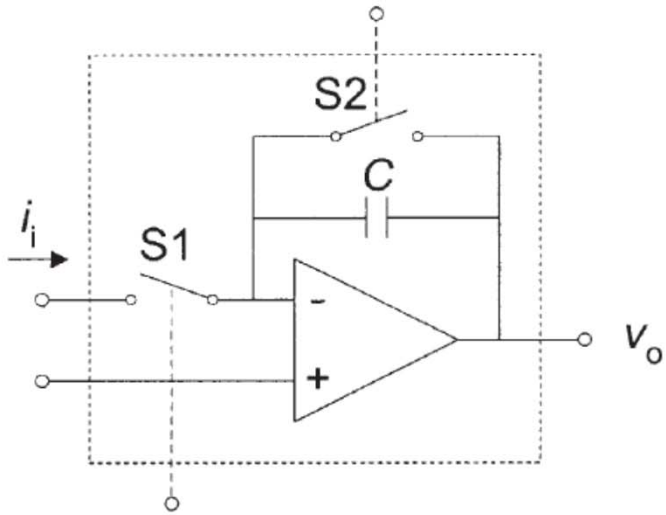
بالانس کردن ac و dc پایه مثبت



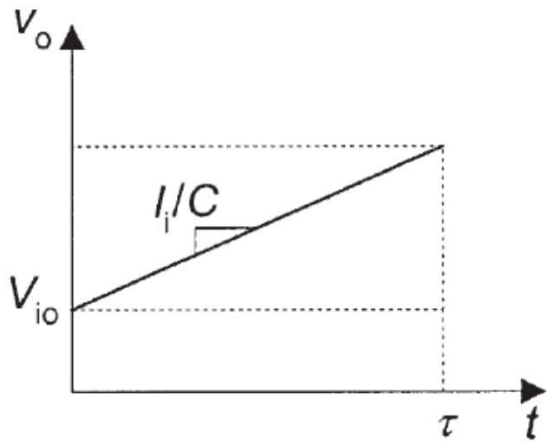


- بالانس مقاومتی: کاهش اثرات DC آپ-امپ
- بالانس خازنی
  - کاهش اثر خازن مود مشترک آپ-امپ
  - کاهش نویز فرکانس پایین جریانی

کاربرد تقویت کننده بار در تقویت جریان



(a)



(b)

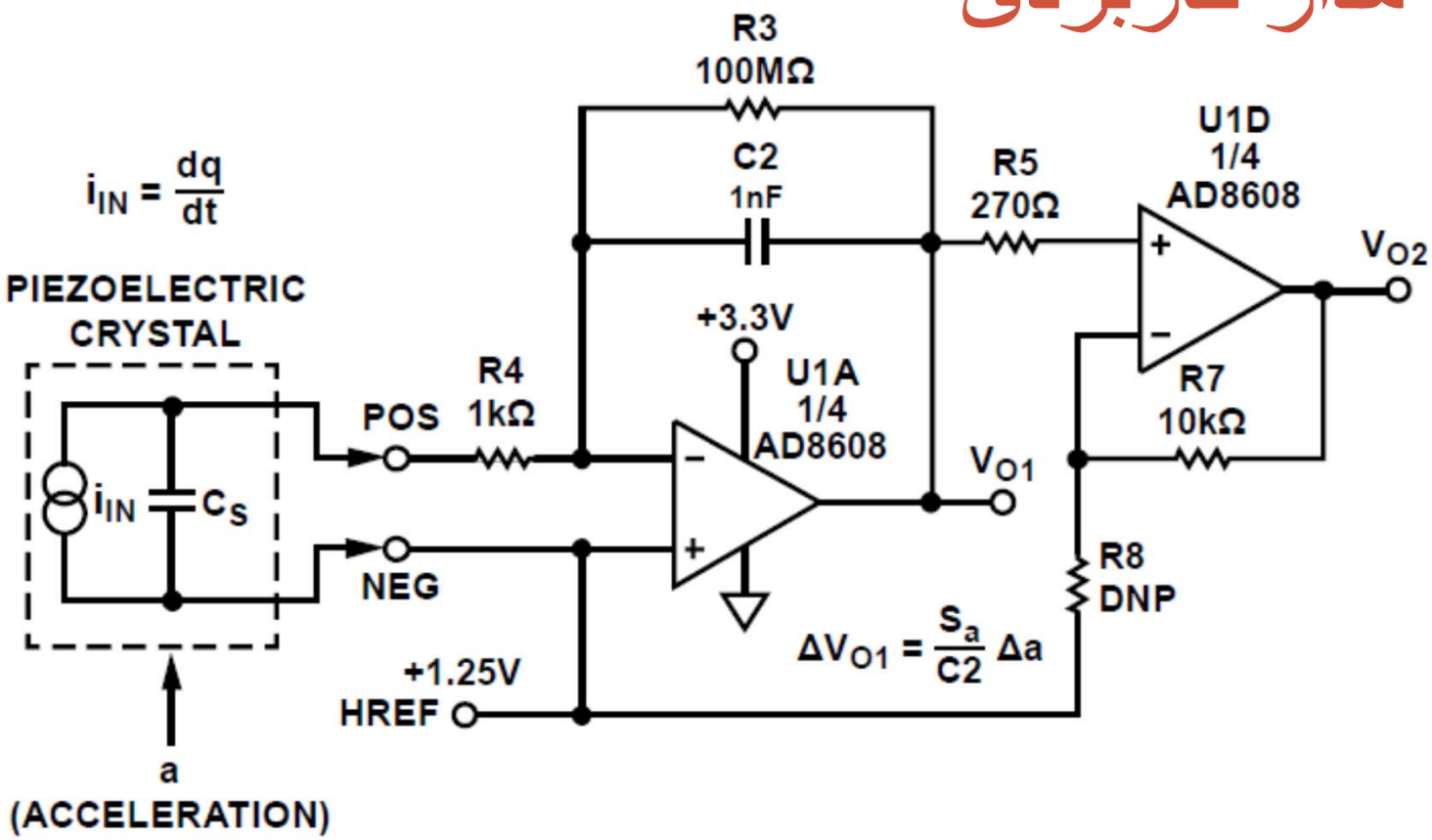
$$V_o = -\frac{I_i \tau}{C}$$

$$V_o = -\frac{(I_i + I_n)\tau}{C} - V_{io}$$

- انتگرالگیر جریان

- افزایش بهره ولتاژ-جریان با افزایش زمان انتگرالگیری
- کاربرد برای اندازه گیری جریانهای کم

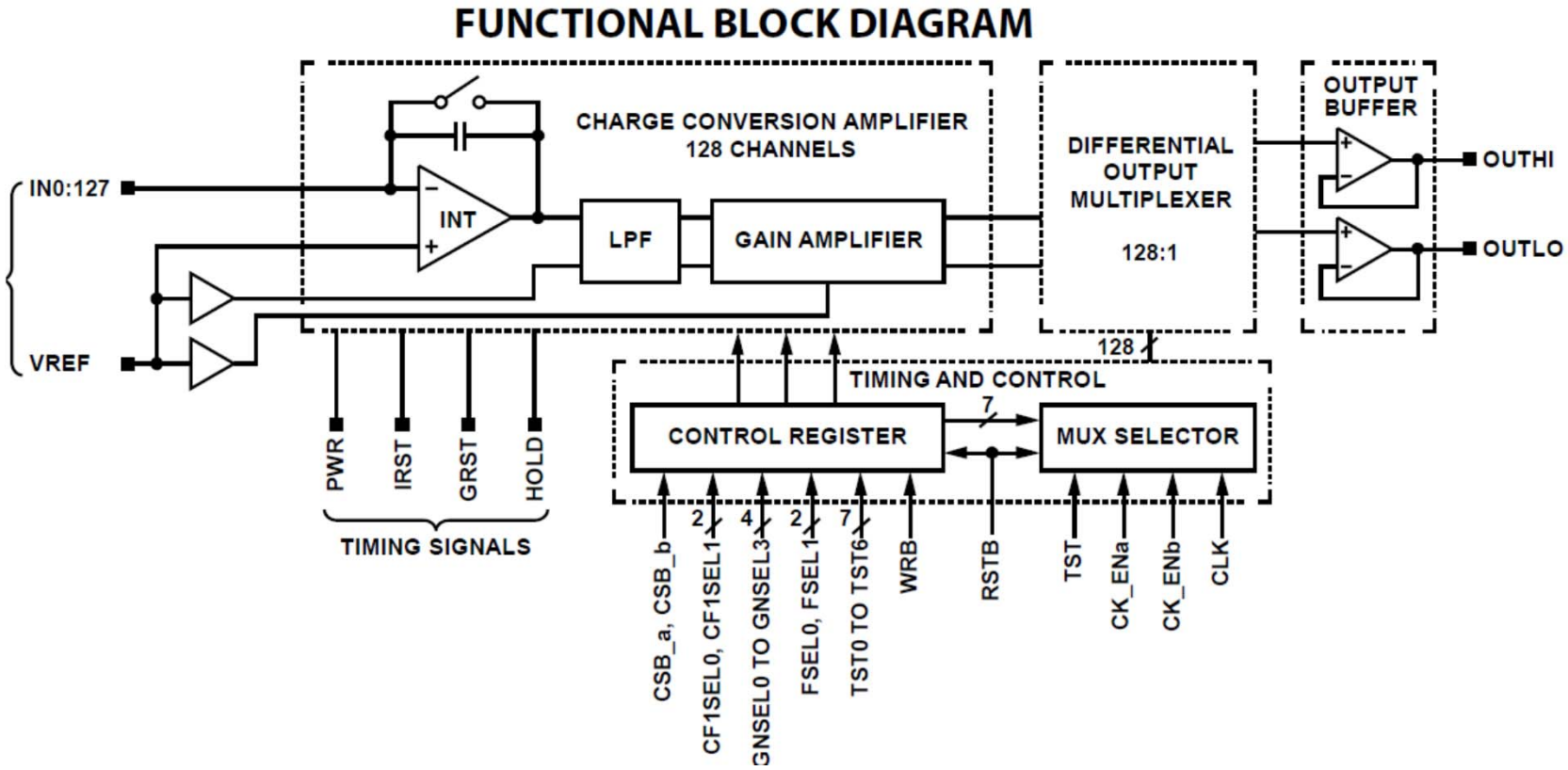
نمونه مدار کاربردی



؟

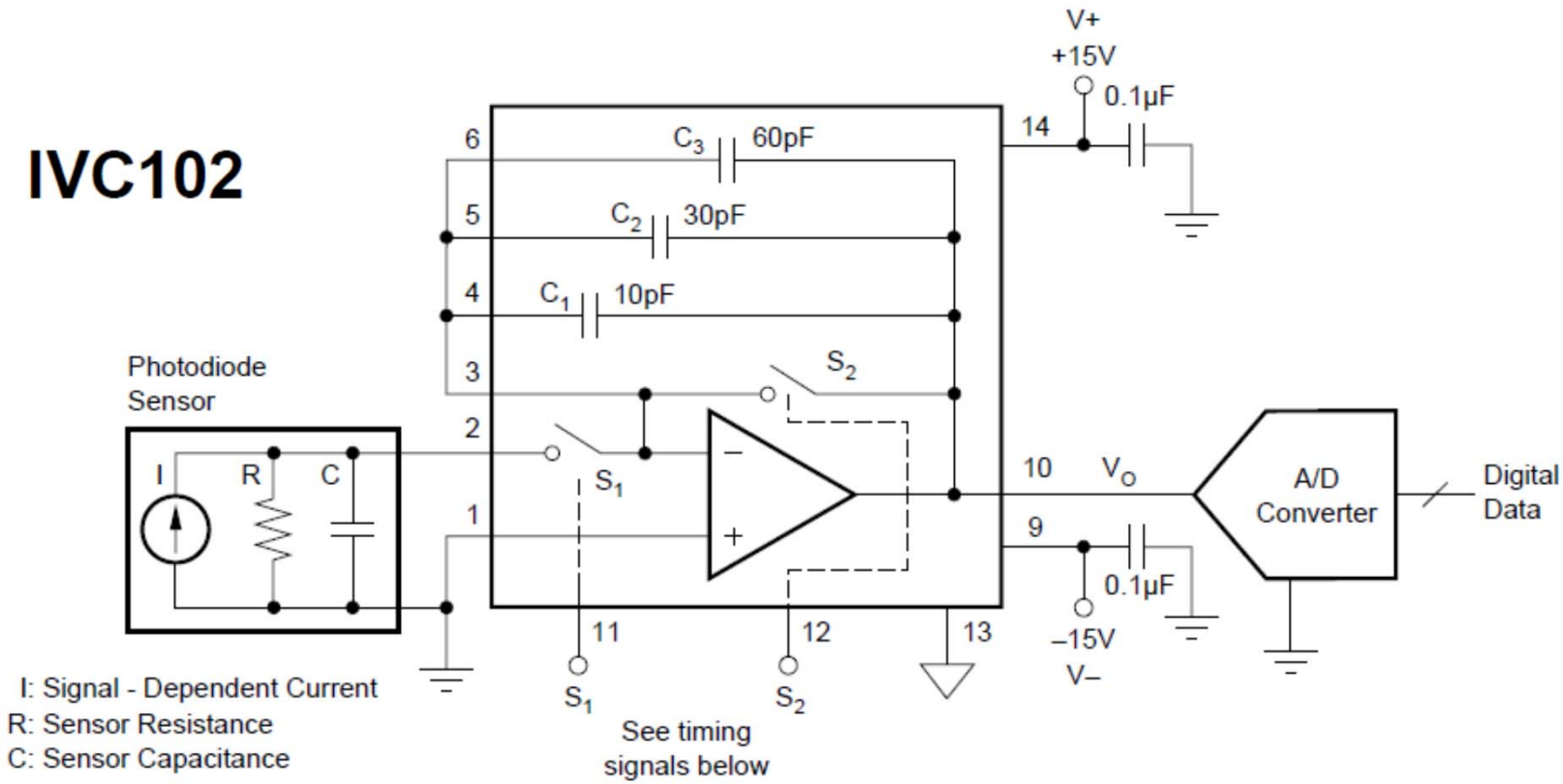
نمونه IC تقویت کننده بار

128-Channel Digital X-Ray Analog Front End



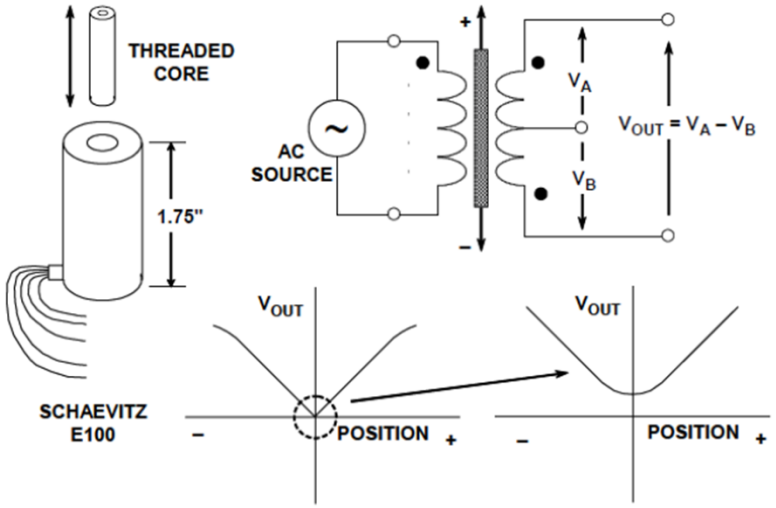
- AD8488: تقویت کننده بار 128 کانالی برای سنسورهای اشعه ایکس (رادیولوژی دیجیتال)

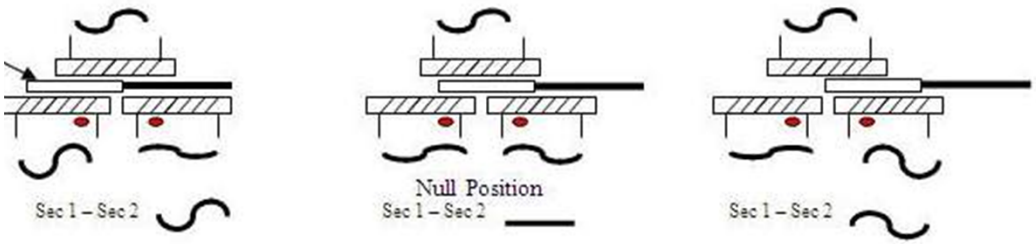
نمونه IC تقویت کننده بار: انتگرالگیر جریان



- تقویت کننده بار 128انتگرالگیر با آپ-امپ JFET

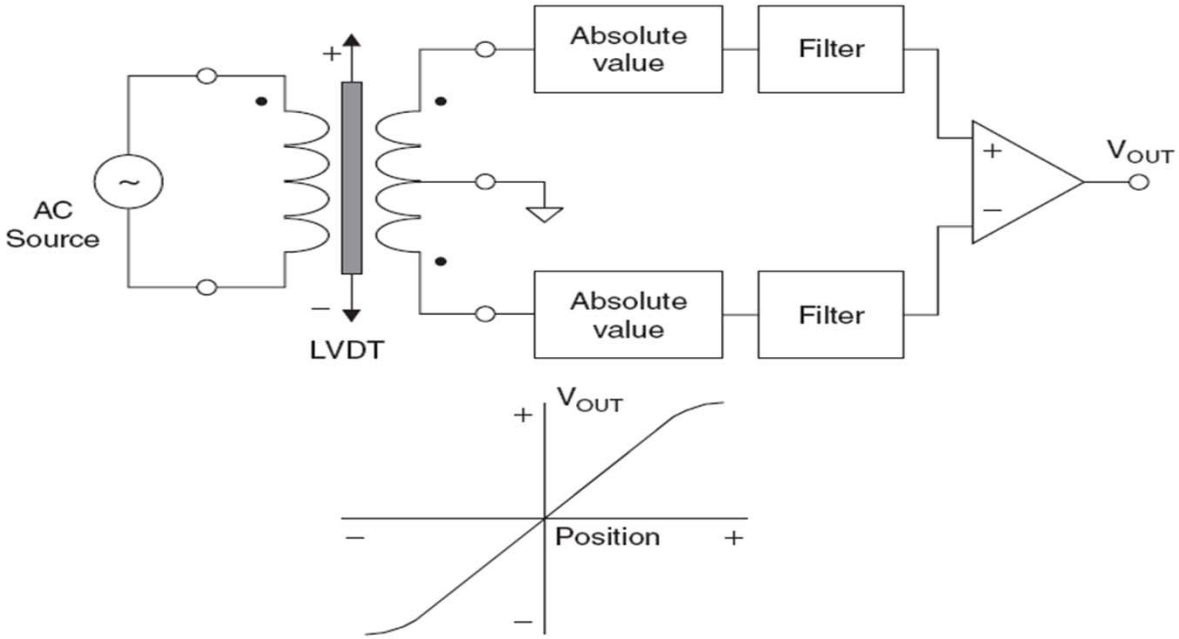
مدارات واسط سنسور LVDT





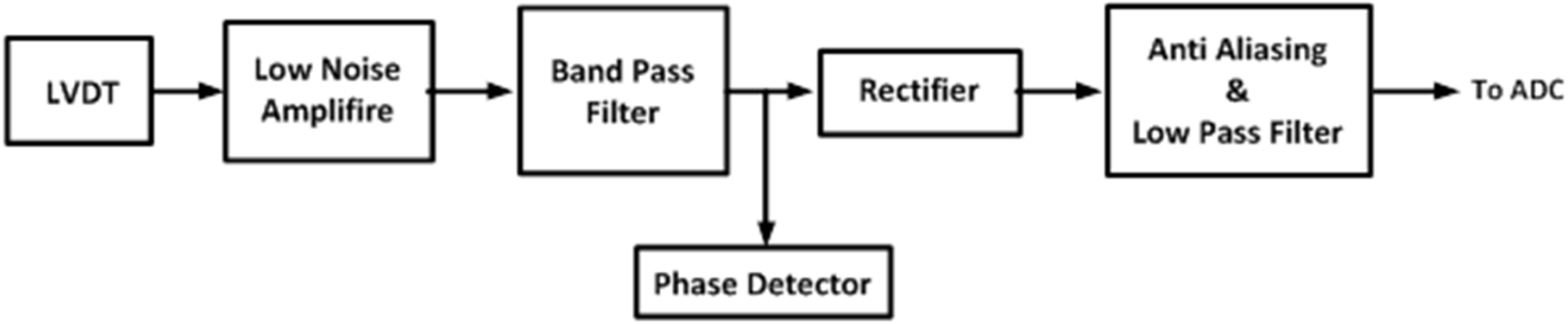
- سیگنال تحریک ورودی: AC با فرکانس چندکیلوهرتز
- سیگنال های خروجی: دامنه AC بزرگ،
- سیگنال تفاضلی: صفر (هسته در وسط)، بزرگ (هسته در انتهای مسیر)
- فاز سیگنال تفاضل خروجی: +/- بر اساس جهت حرکت

مدار واسط LVDT برپایه یکسوساز



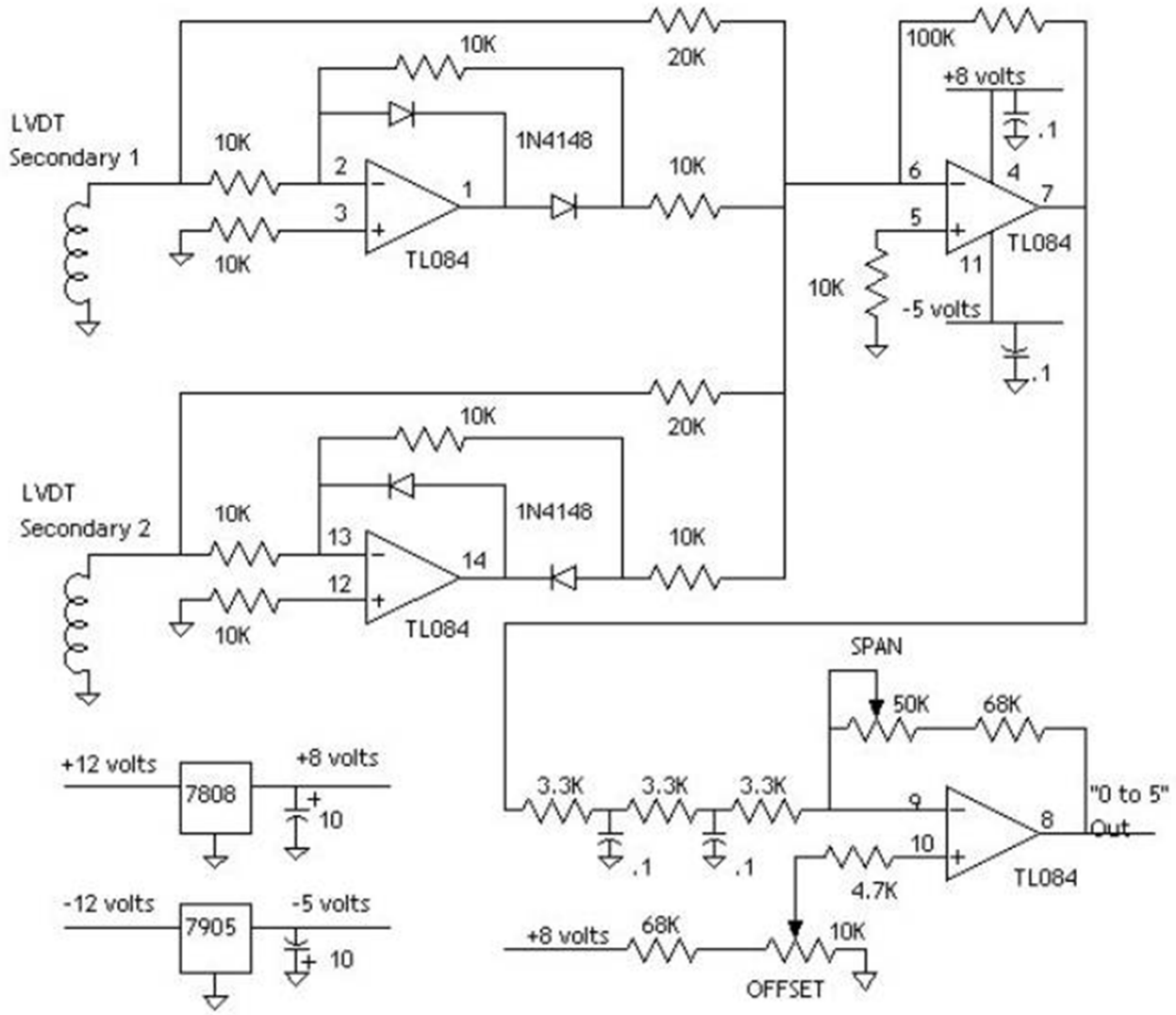
- یکسوسازی مجزای دو خروجی و فیلتر کردن : خروجی DC بدون ریپل
- تفاضل دو خروجی بوسیله تقویت کننده تفاضلی
- امکان فیلتر کردن پس از تفاضل
- عدم نیاز به شناسایی فاز سیگنال
- نیاز به دقت و پایداری بسیار بالای سیگنال تحریک ورودی

مدار واسط LVDT برپایه یکسوساز

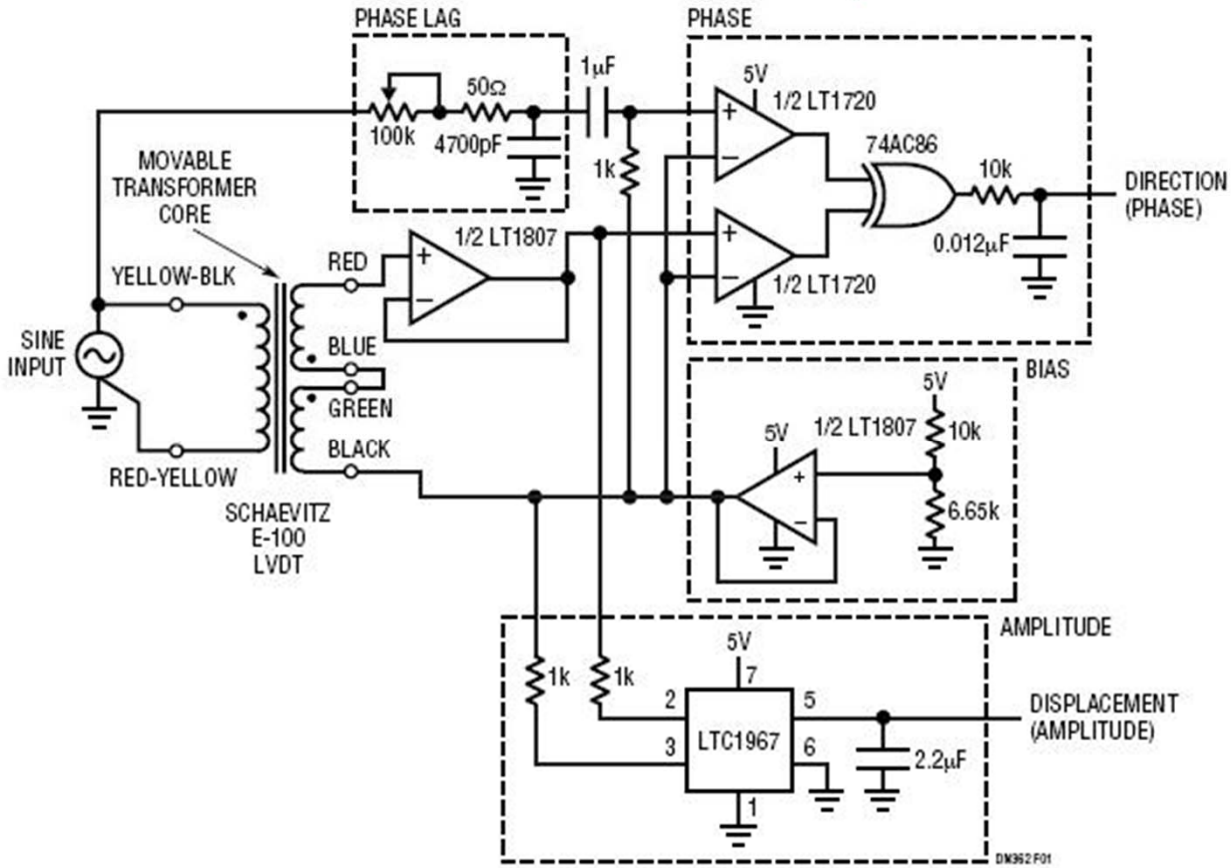


- اتصال خروجی های LVDT بصورت تفاضلی
- استفاده از یک مدار یکسوساز و یک فیلتر: خروجی DC بدون ریپل
- نیاز به شناسایی فاز سیگنال: مدار آشکار ساز فاز
- نیاز به دقت و پایداری بسیار بالای سیگنال تحریک ورودی

مدار واسط LVDT برپایه یکسوساز

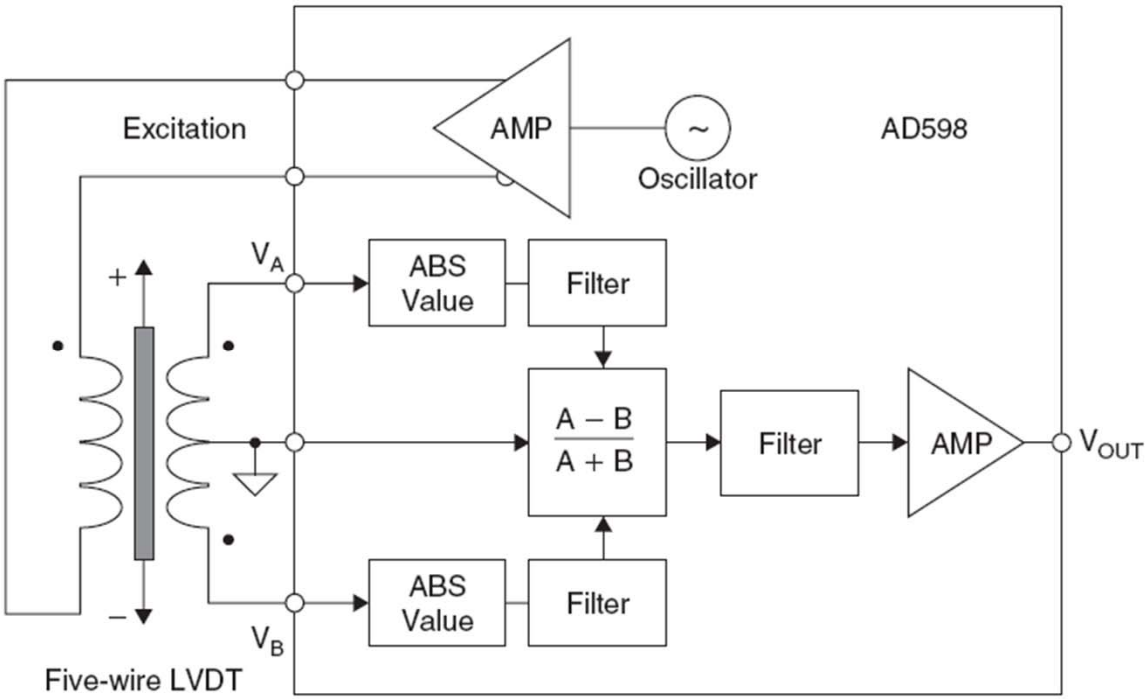


مدار واسط LVDT برپایه یکسوساز



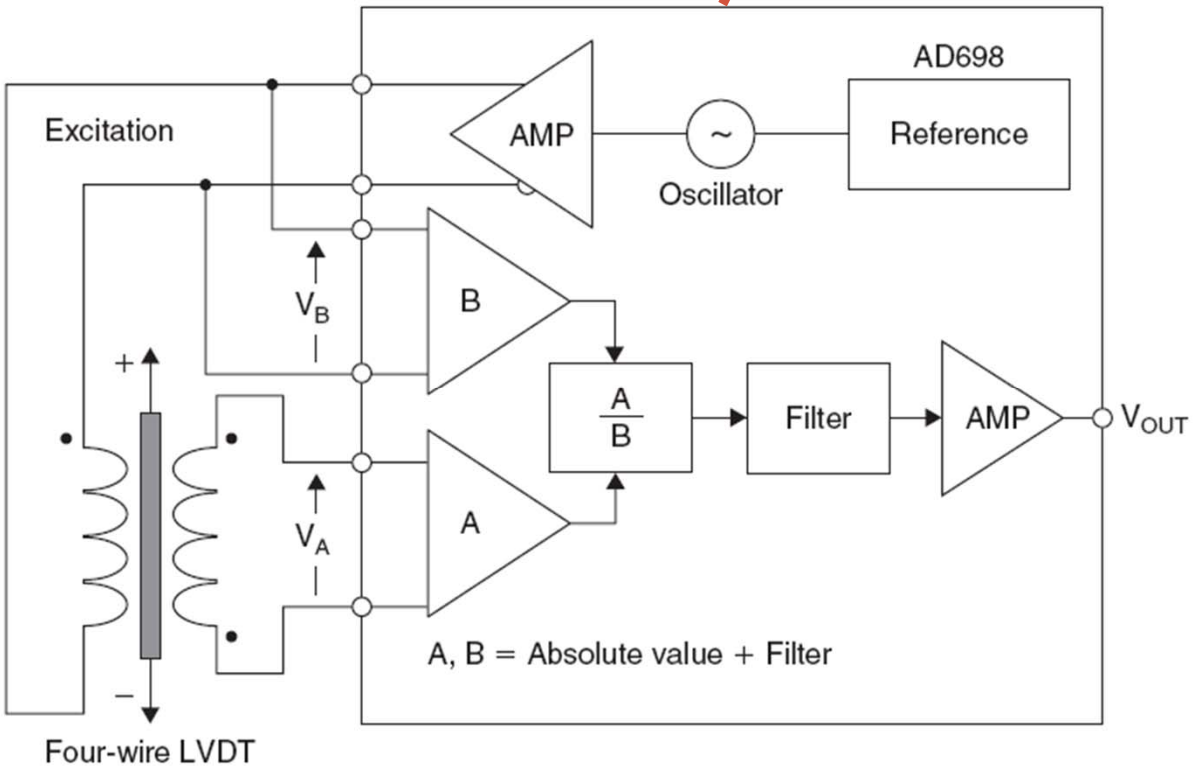
- استفاده از LTC1967 (true-rms detector) IC

مدار واسط LVDT برپایه یکسوساز و نسبت



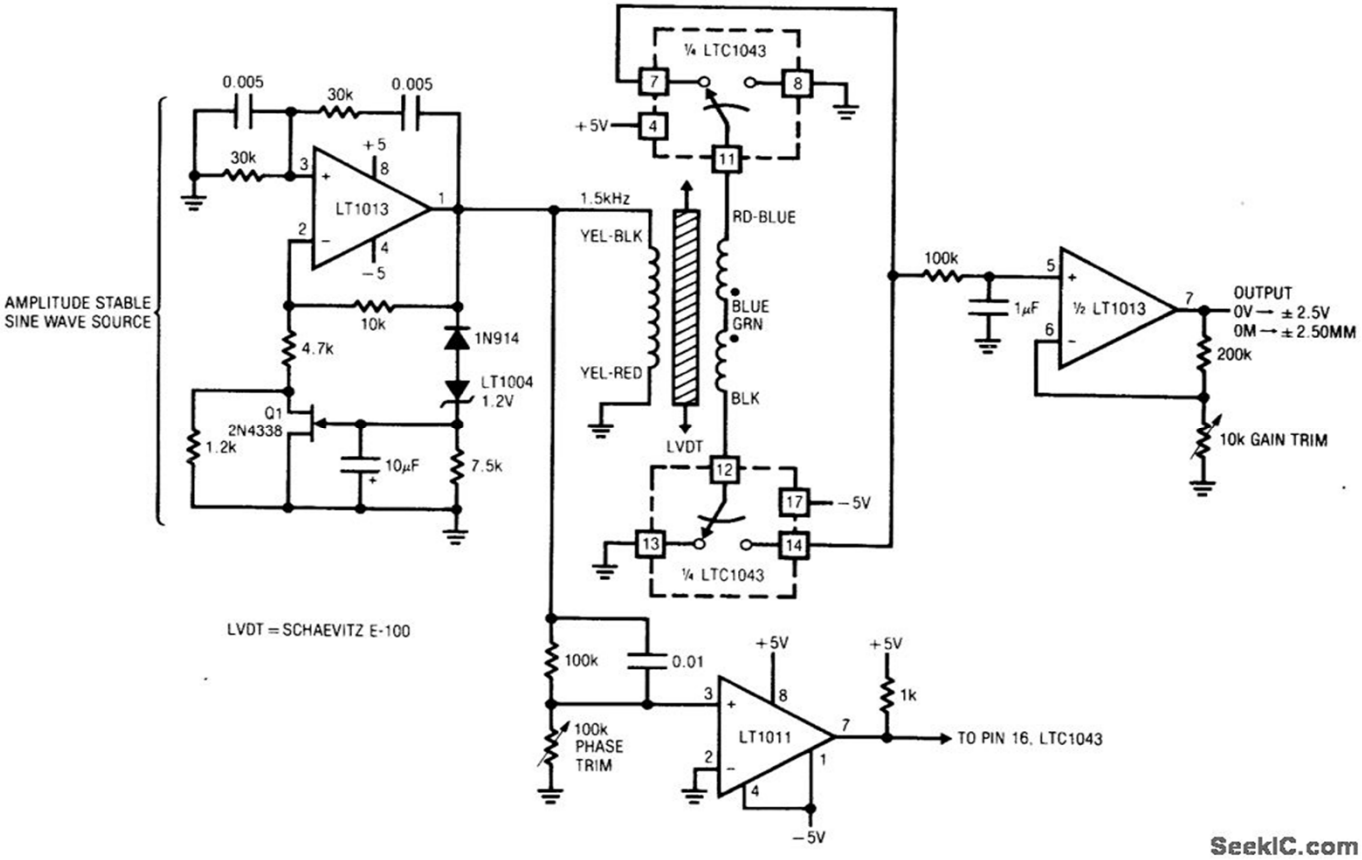
- یکسوسازی مجزای دو خروجی فیلترکردن
- محاسبه نسبت تفاضل به جمع سیگنالها و فیلتر نهایی
- عدم نیاز به آشکار سازی فاز
- **عدم** نیاز به دقت و پایداری بسیار بالای سیگنال تحریک ورودی

مدار واسط LVDT برپایه دمدولاسیون



- دمدولاسیون خروجی تفاضلی LVDT با نمونه ای از سیگنل ورودی
- محاسبه نسبت سیگنالها و فیلتر نهایی
- عدم نیاز به آشکار سازی فاز
- **عدم** نیاز به دقت و پایداری بسیار بالای سیگنال تحریک ورودی

مدار واسط LVDT برپایه دمدولاسیون

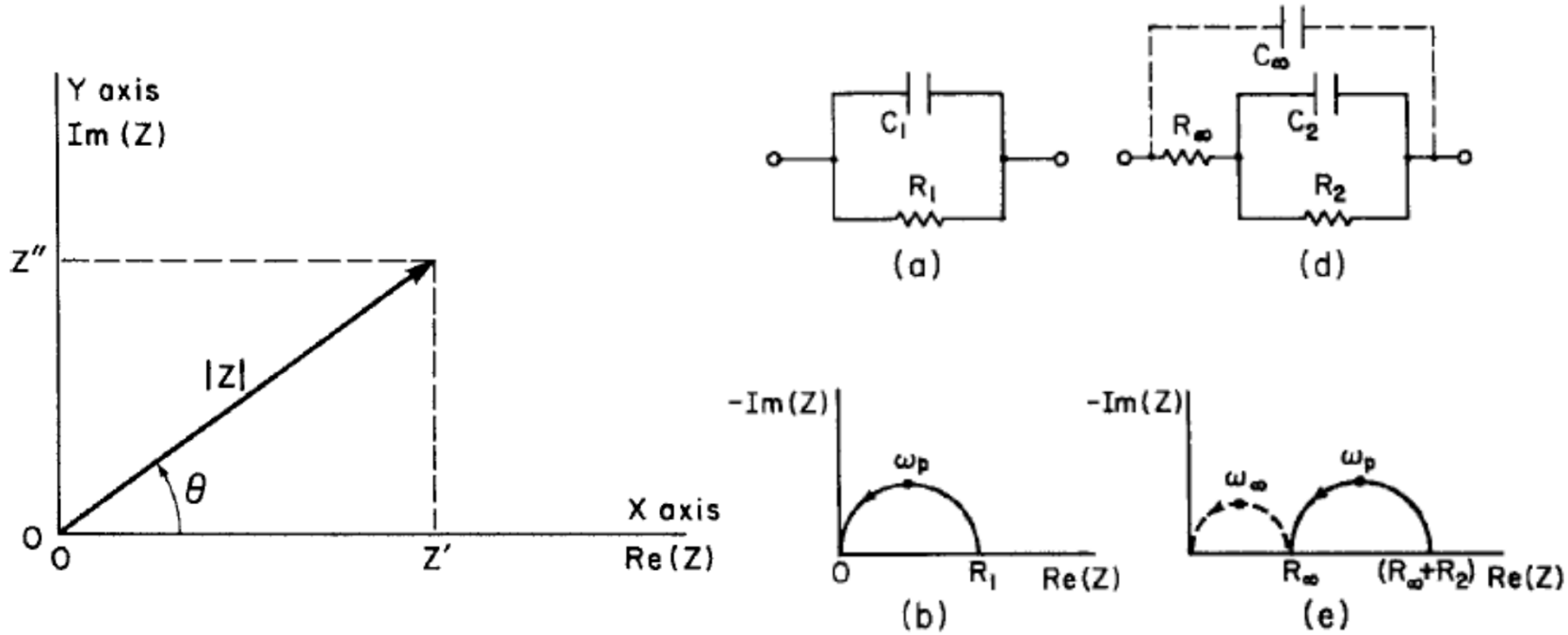


- دمدولاسیون خروجی تفاضلی LVDT با نمونه ای از سیگنل ورودی
- استفاده از مدار Switched-capacitor به عنوان میکسر
- نیاز به دقت و پایداری بسیار بالای سیگنال تحریک ورودی

اندازه گیری امپدانس و مدارات وابسته

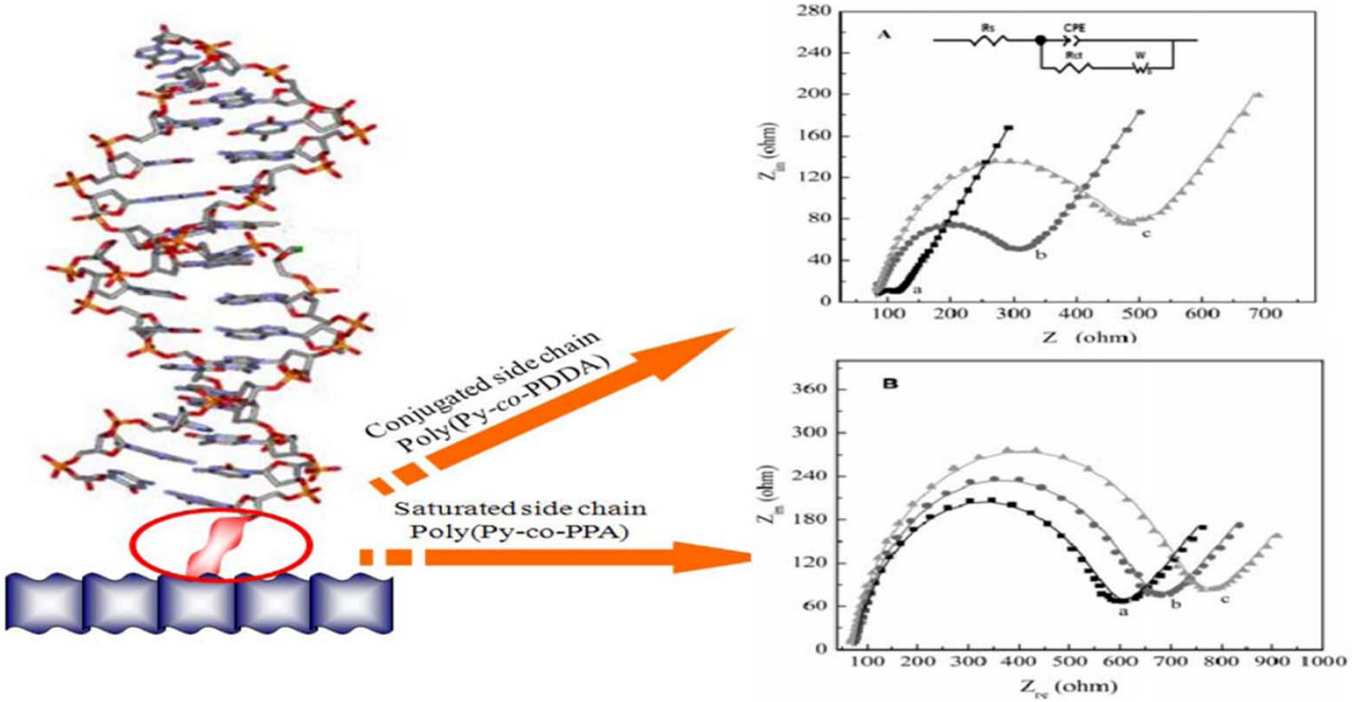
- اندازه گیری امپدانس: سنسور های الکتروشیمیایی
  - تک فرکانس
  - طیف سنجی
- تکنیکهای اندازه گیری طیف امپدانس
- روش فرکانس
  - تک فرکانس سینوسی با سوییپ فرکانس(single-tone)
  - چند فرکانس سینوسی همزمان (multi-tone)
- روش زمانی
  - استفاده از سیگنال با عرض باند وسیع و استفاده از تبدیل فرکانسی
  - سیگنال با عرض باند وسیع: Shirp, Sinc, Gaussian, …

طیف سنجی امپدانس



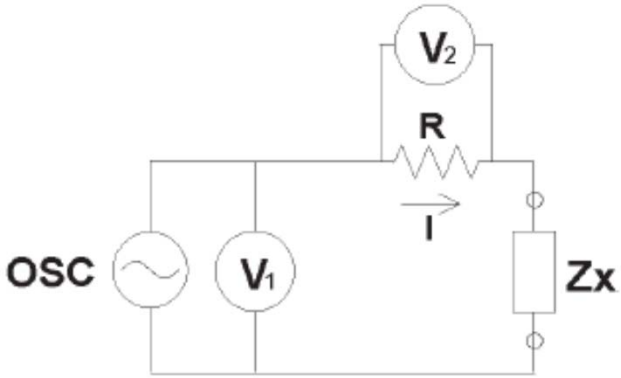
- اندازه گیری امپدانس: اندازه گیری مقادیر حقیقی و موهومی (اندازه و فاز) در یک فرکانس مشخص
- طیف سنجی امپدانسی: رسم گیری مقادیر حقیقی و موهومی امپدانس در فرکانس های مختلف (DC تا بی نهایت) (منحنی نایکوئیست)

کاربرد های طیف سنجی امپدانسی



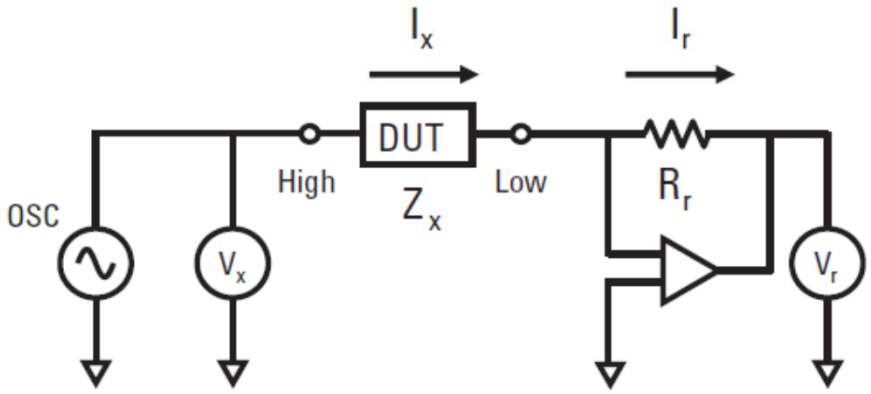
- طیف سنجی امپدانسی: ارائه کل اطلاعات امپدانسی نمونه در یک گراف
  - بیوسنسورها و سنسورهای مبتنی بر واکنش الکترو شیمیایی
  - تحلیل خوردگی در فلزات
  - امکان یافتن نقایص باتری ها و پیل های سوختی
  - تحلیل کیفیت نیمه هادی های آلی (ارگانیک)
  - بررسی کیفیت مواد غذایی

روش اندازه گیری تک فرکانسی



$$Zx = \frac{V_1}{I} = \frac{V_1}{V_2} R$$

- اعمال ولتاژ سینوسی «تمیز» با دامنه و فرکانس ثابت



- اندازه گیری جریان بوسیله مبدل جریان به ولتاژ

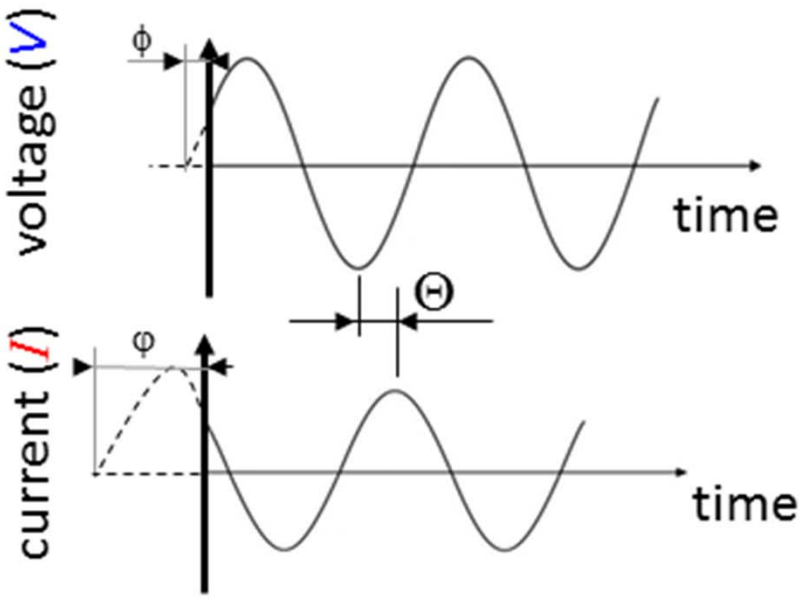
- محاسبه دامنه و فاز

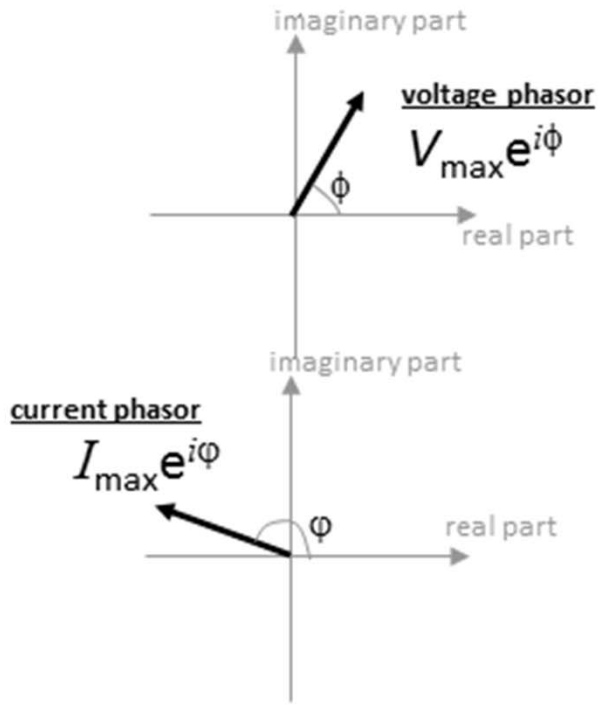
$$\frac{V_x}{Z_x} = I_x = I_r = \frac{V_r}{R_r}$$

$$\longrightarrow Z_x = \frac{V_x}{I_x} = R_r \frac{V_x}{V_r}$$

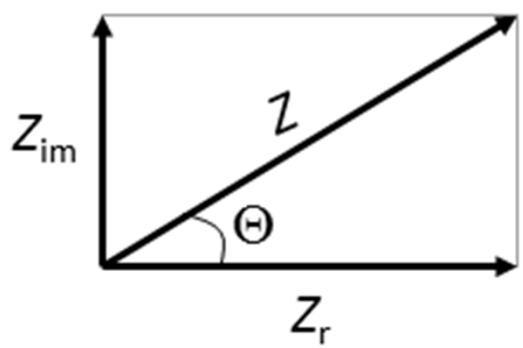
- تغییر فرکانس در صورت نیاز به طیف سنجی

روش اندازه گیری تک فرکانسی

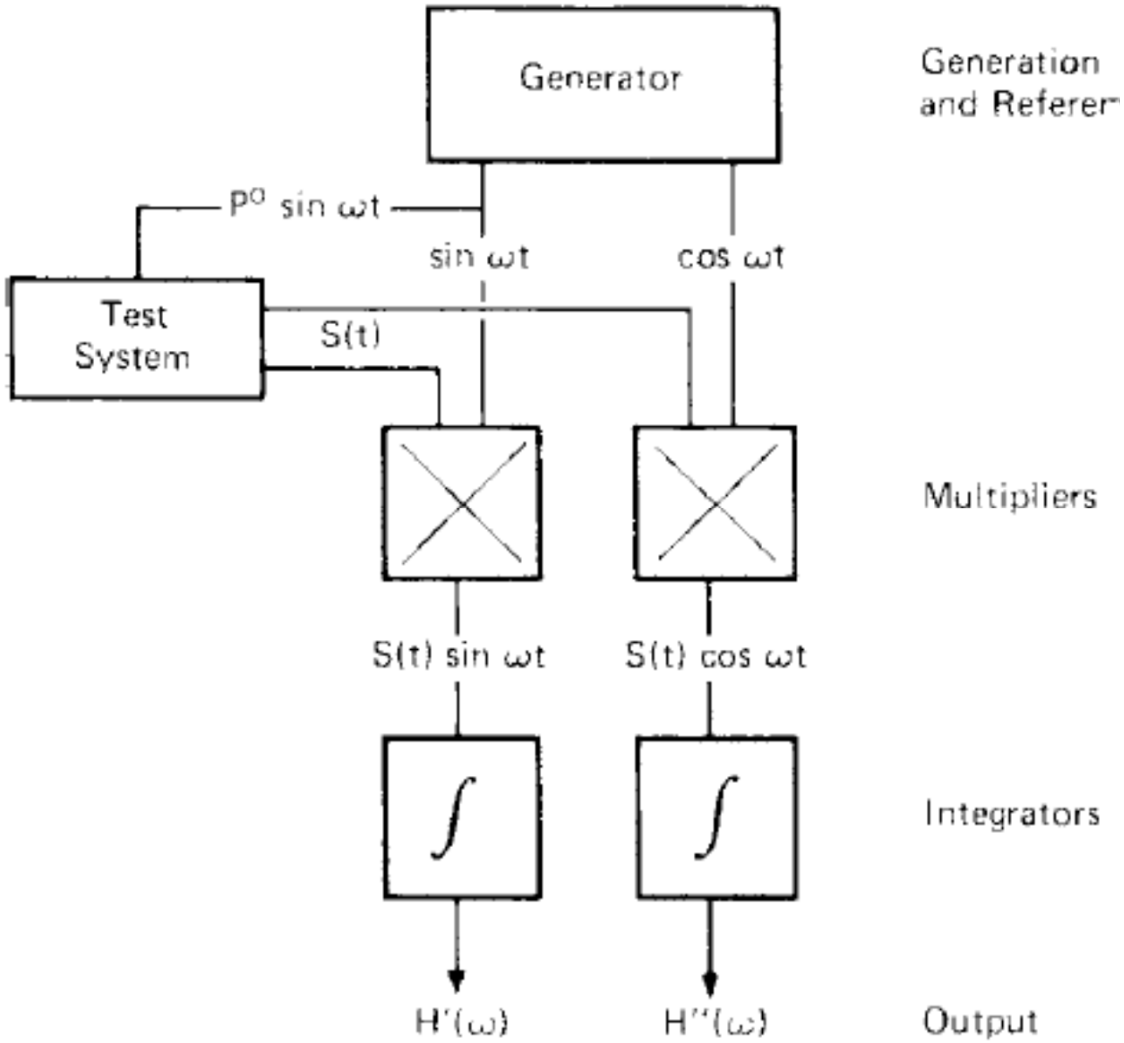




$$Z = \frac{V_{max}e^{i\phi}}{I_{max}e^{i\varphi}} = |Z|\,e^{i\Theta} = Z_r + i\cdot Z_{im}$$



روش اندازه گیری تک فرکانسی مستقیم



- محاسبه مستقیم مقادیر حقیقی و موهومی امپدانس
- استفاده از دو سیگنال سینوسی با فاز 90 درجه
- انتگرال گیری آنالوگ یا دیجیتال

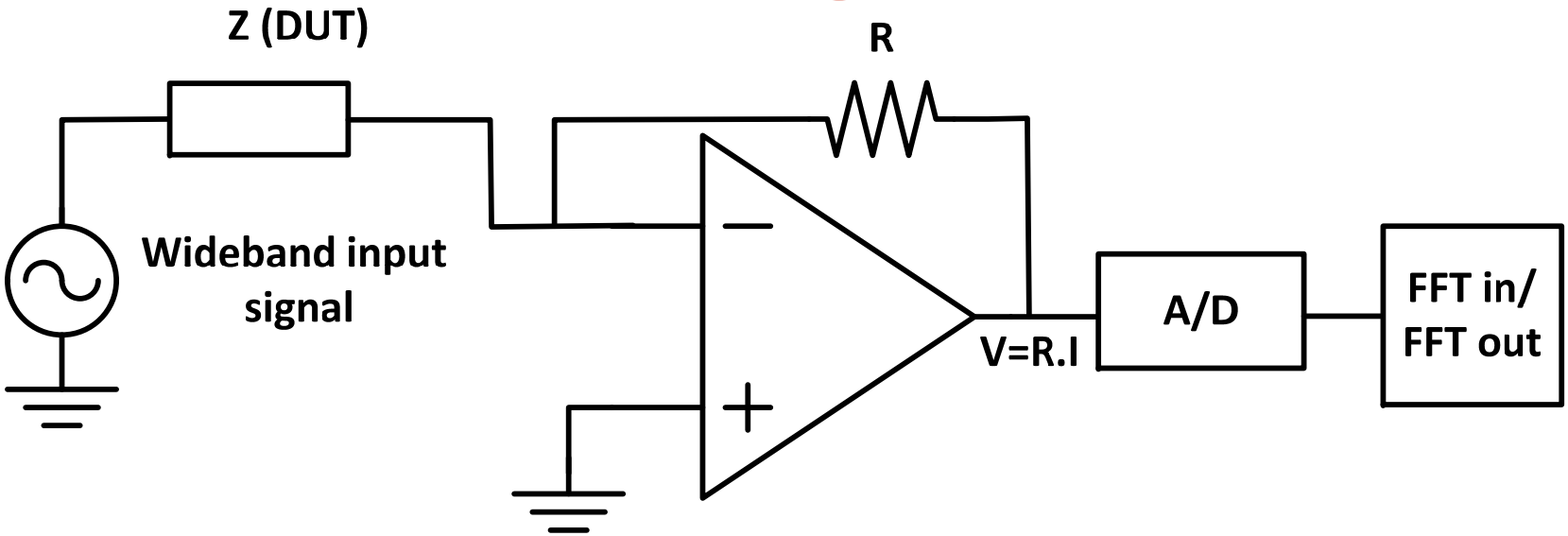
$$P(t) = P^0 \sin(\omega t)$$

$$S(t) = P^0 |Z(\omega)| \sin[\omega t + \phi(\omega)]$$

$$H'(\omega) = \frac{1}{T}\int_0^T S(t)\sin(\omega t)dt$$

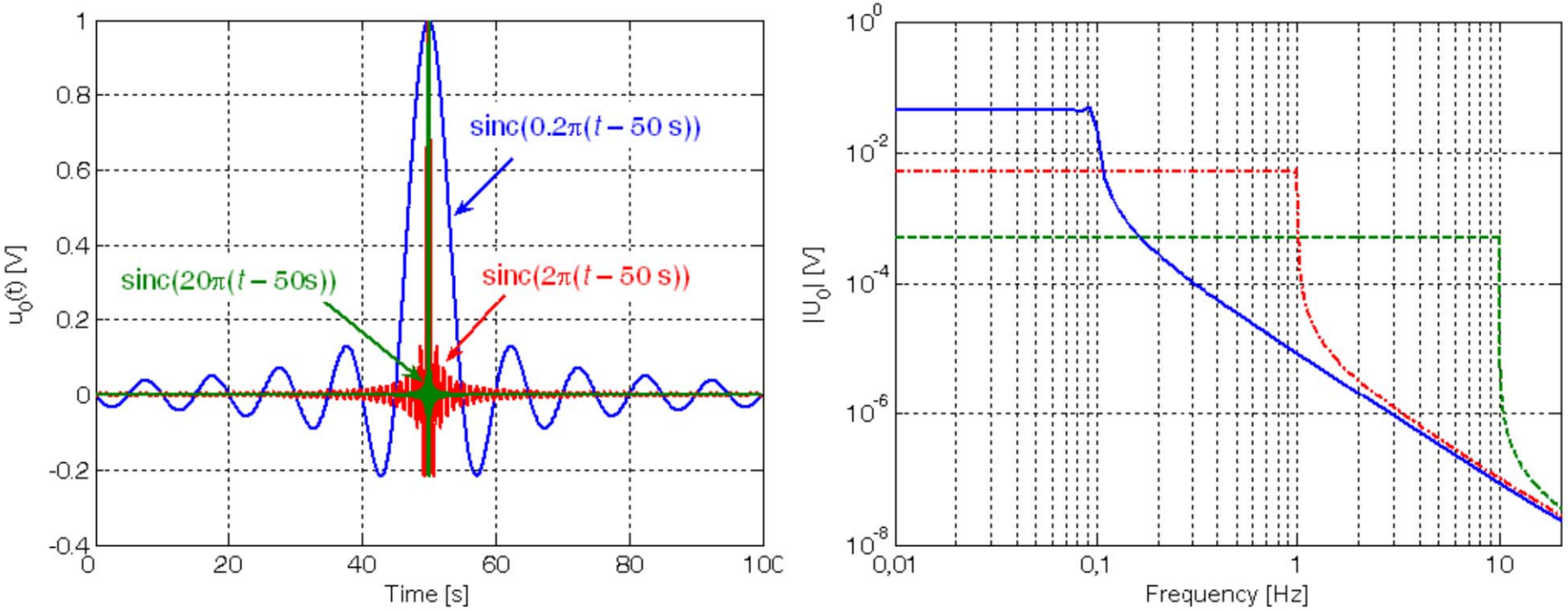
$$H''(\omega) = \frac{1}{T}\int_0^T S(t)\cos(\omega t)dt$$

روش اندازه گیری زمانی



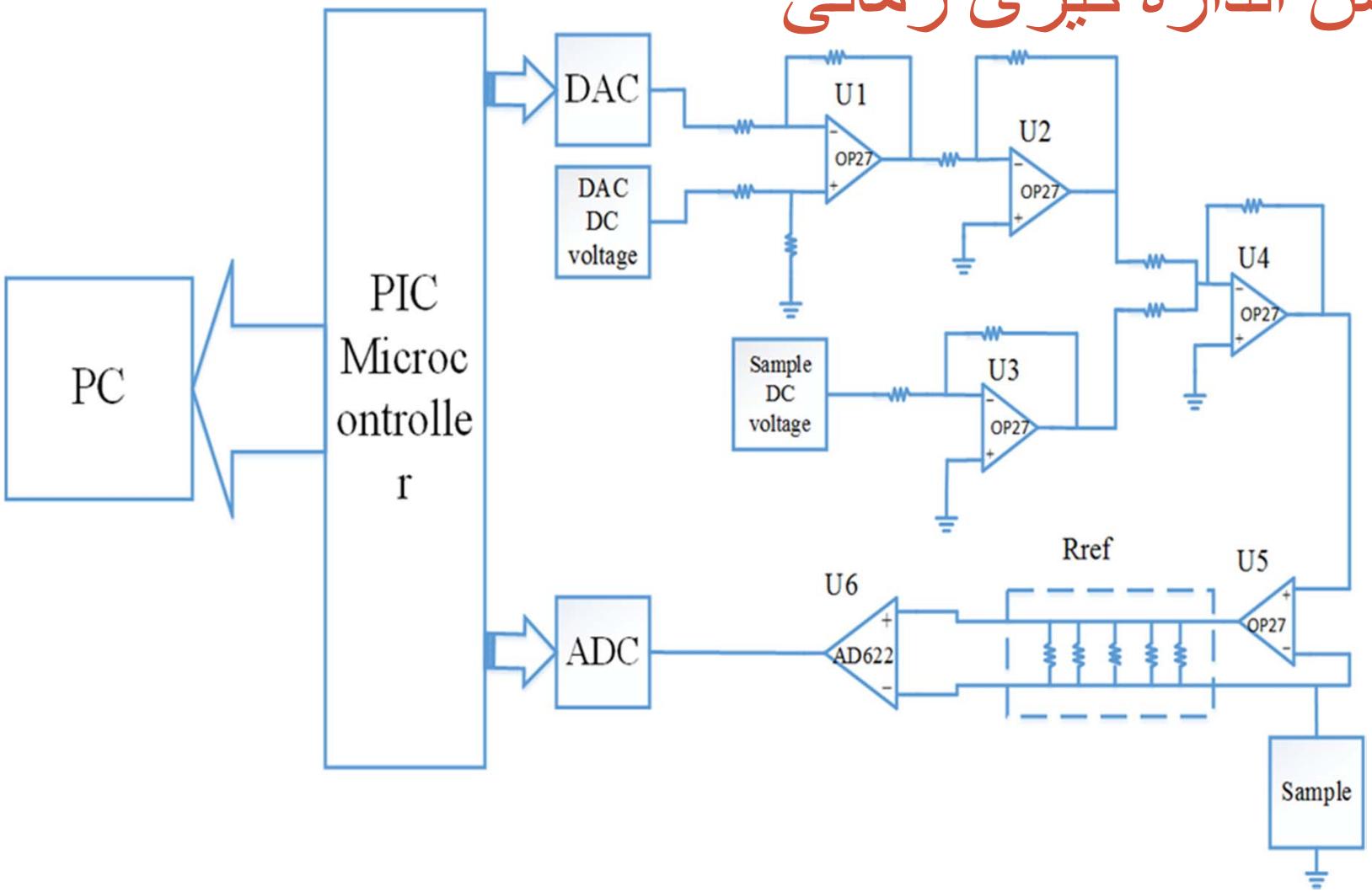
- سیگنال ورودی: سیگنال با عرض باند وسیع (طیف سفید یا نزدیک به مربعی)
- طیف خروجی: متناسب با امپدانس یا ادمیتانس
- تبدیل آنالوگ به دیجیتال
- طیف امپدانس (ادمیتانس): نسبت تبدیل فوریه سیگنال خروجی به ورودی
- بدست آوردن طیف امپدانس بصورت یکجا

برخی سیگنالهای اندازه گیری امپدانس



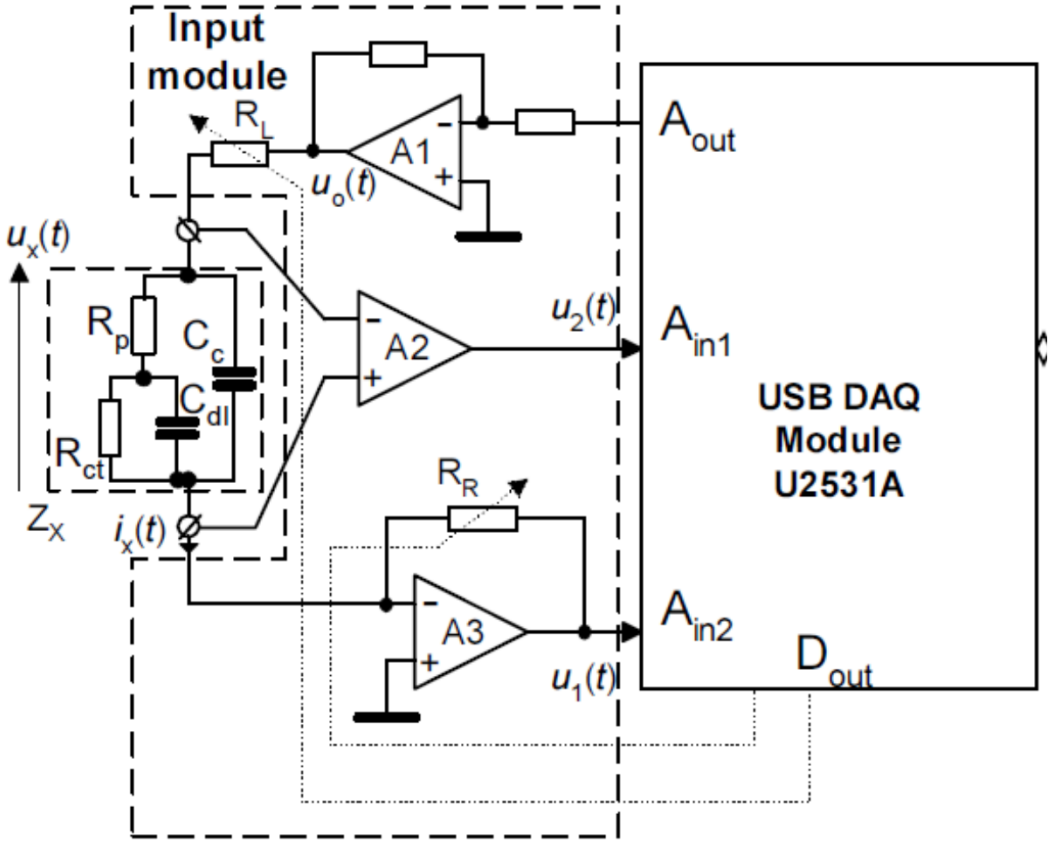
- برخی سیگنالهای مناسب: سینک، گوسی، شیب، ...

روش اندازه گیری زمانی



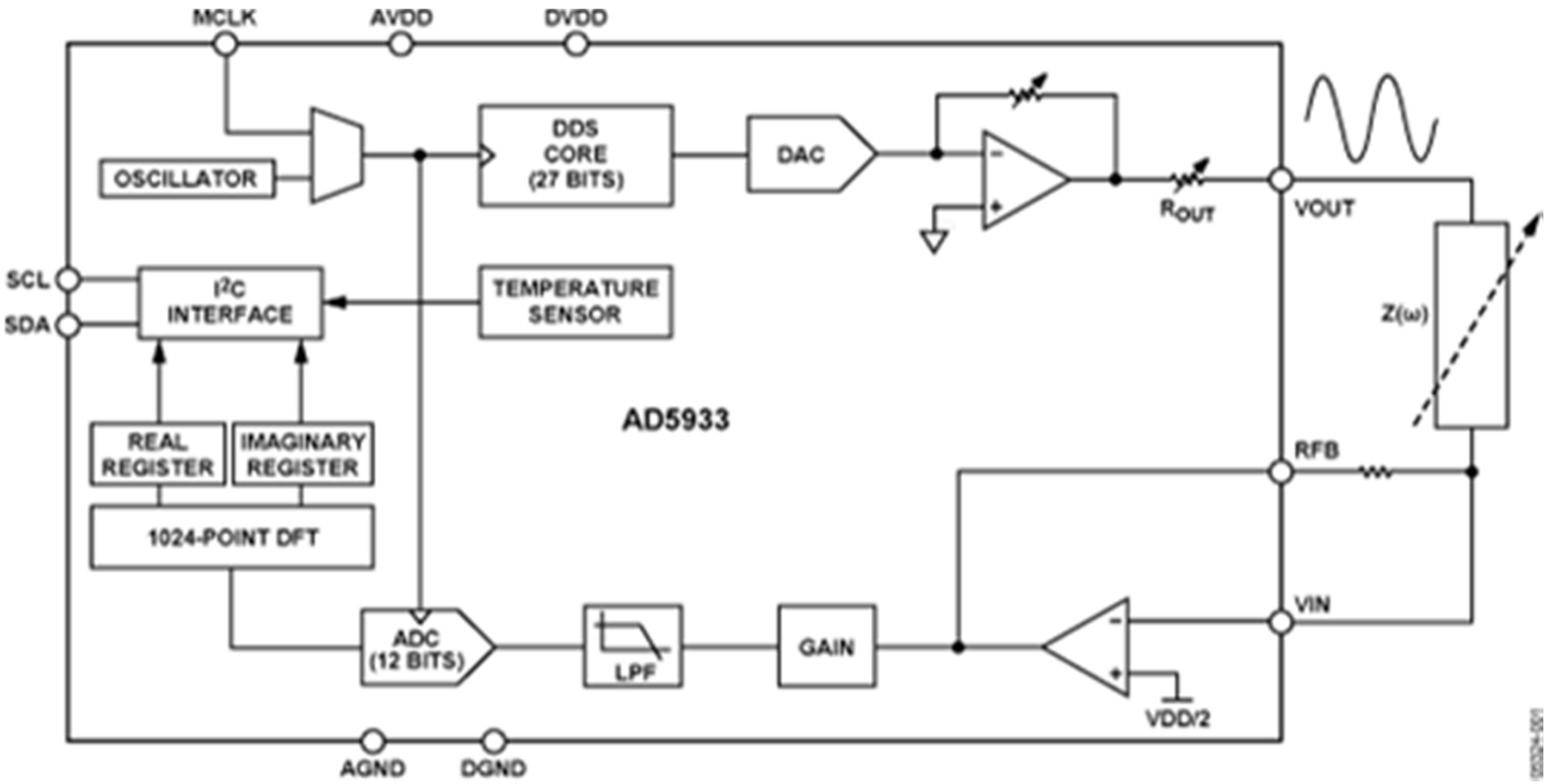
- نمونه سیستم

نمونه های دیگر از پیاده سازی مداری



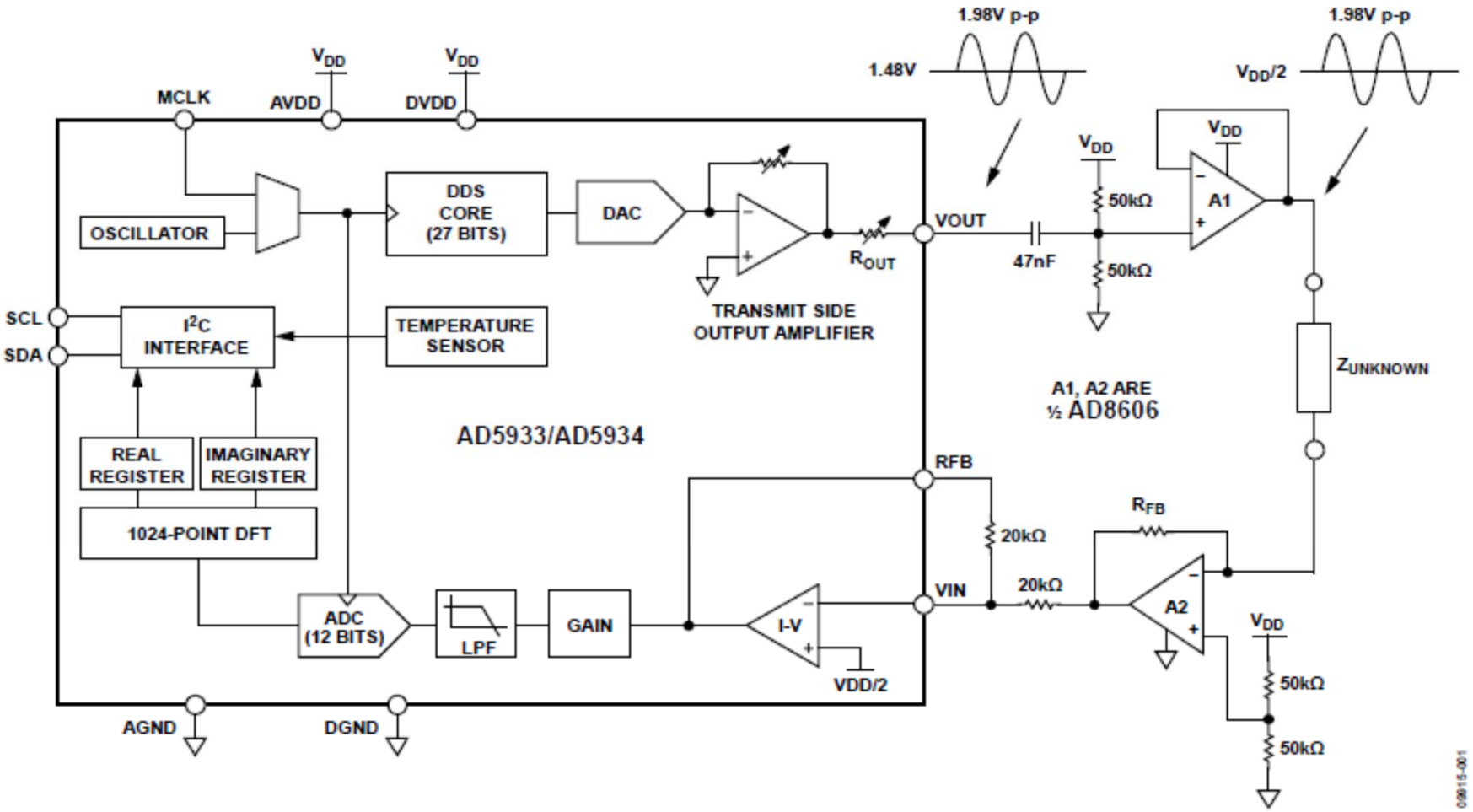
- استفاده از دو مدار مستقل برای اندازه گیری جریان و ولتاژ

نمونه IC برای اندازه گیری امپدانس



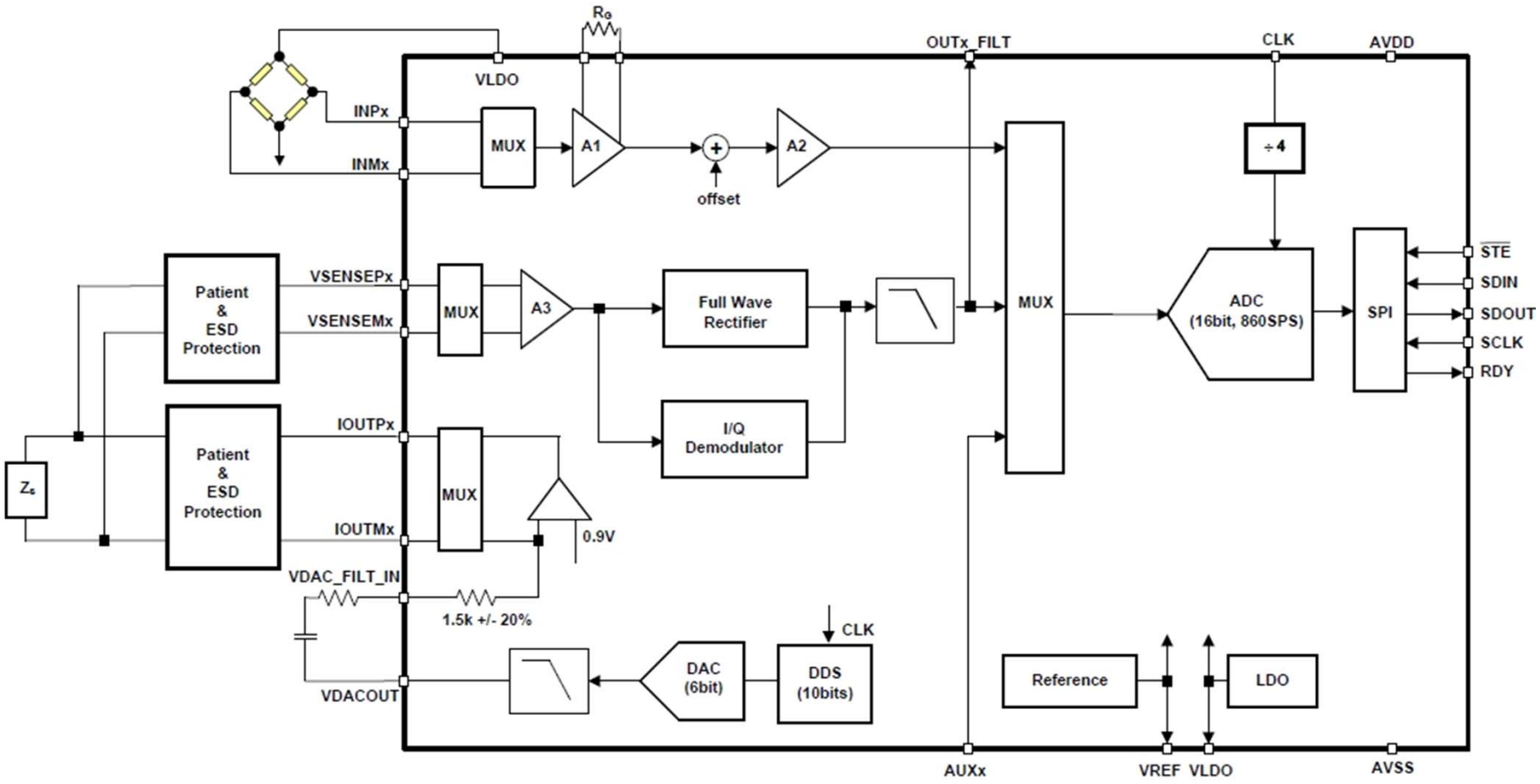
؟

نمونه IC برای اندازه گیری امپدانس

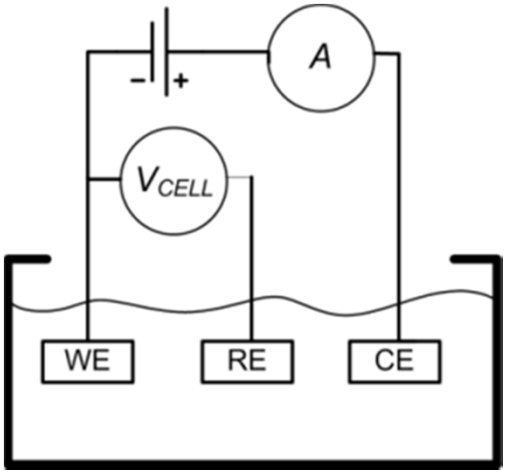


نمونه IC برای اندازه گیری امپدانس

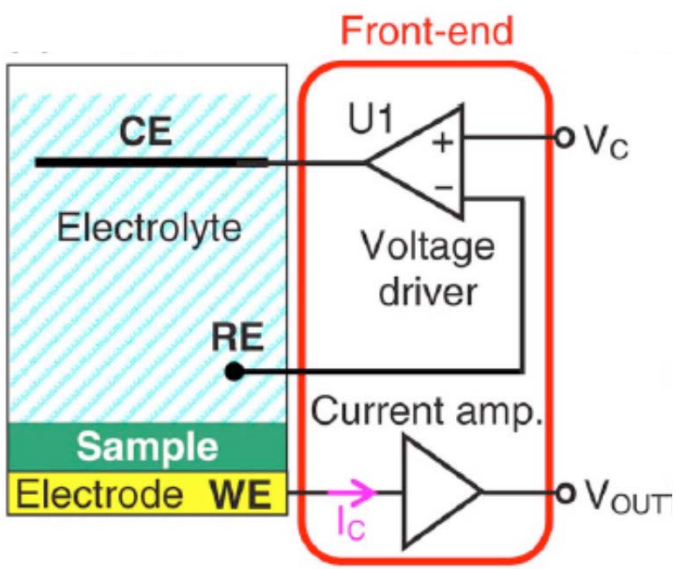
AFE4300 (TI)



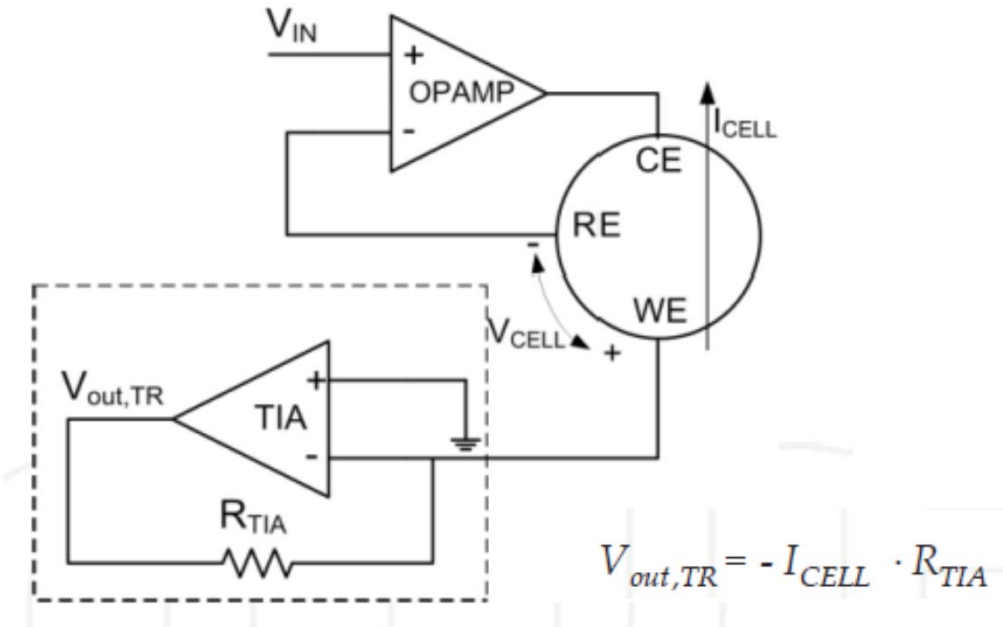
مدارات سلول الکتروشیمیایی



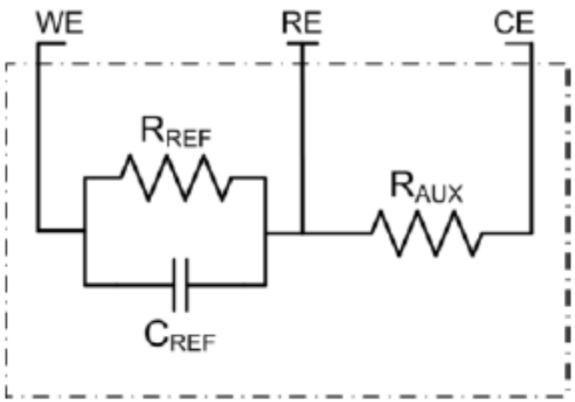
- سلول الکتروشیمیایی: (3-electrode cell)
- تولید جریان متناسب با واکنش اکسیداسیون (احیا) در WE
  - Working Electrode: واکنش اکسیداسیون-احیا با آنالیت
  - Counter Electrode: الکترود خنثی، جهت اندازه گیری جریان
  - Reference Electrode: الکترود خنثی، تنظیم ولتاژ WE ، عدم عبور جریان
- وظایف مدار potentiostat:
  - تثبیت ولتاژ RE بدون عبور جریان از آن
  - اندازه گیری جریان واکنش بین WE و CE
  - تامین جریان و ولتاژ بایاس الکترودهای WE و CE
- اندازه گیری جریان در محدوده pA و nA
- پایداری مدار: قرار گرفتن الکترولیت در فیدبک



نمونه مدار Potentiostat



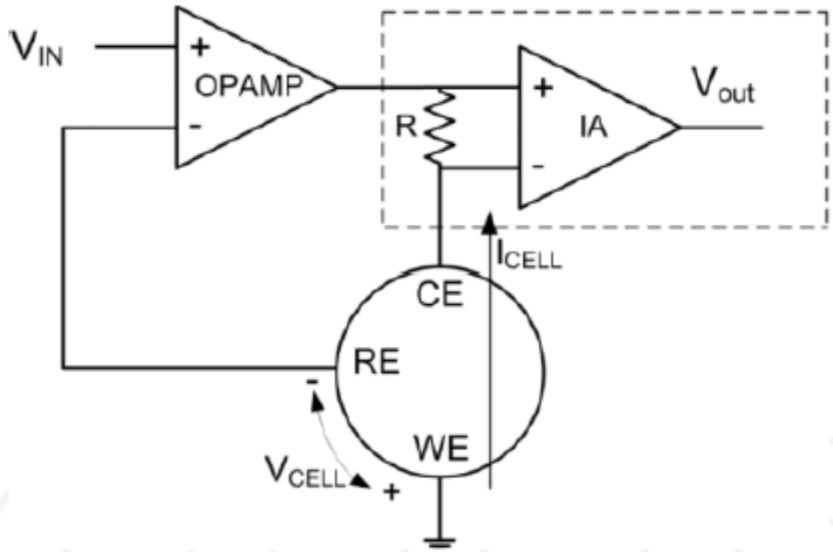
$$V_{out,TR} = -I_{CELL} \cdot R_{TIA}$$



مدل ساده شده الکترولیت

- مدار Potentiostat با آپ-امپ درایو و مبدل جریان به ولتاژ
- WE در پتانسیل «صفر» بوسیله زمین مجازی
- نیاز به آپ-امپ با جریان بایاس کم
- امکان استفاده از تقویت کننده بار به جای جریان برای جریانهای بسیار کم

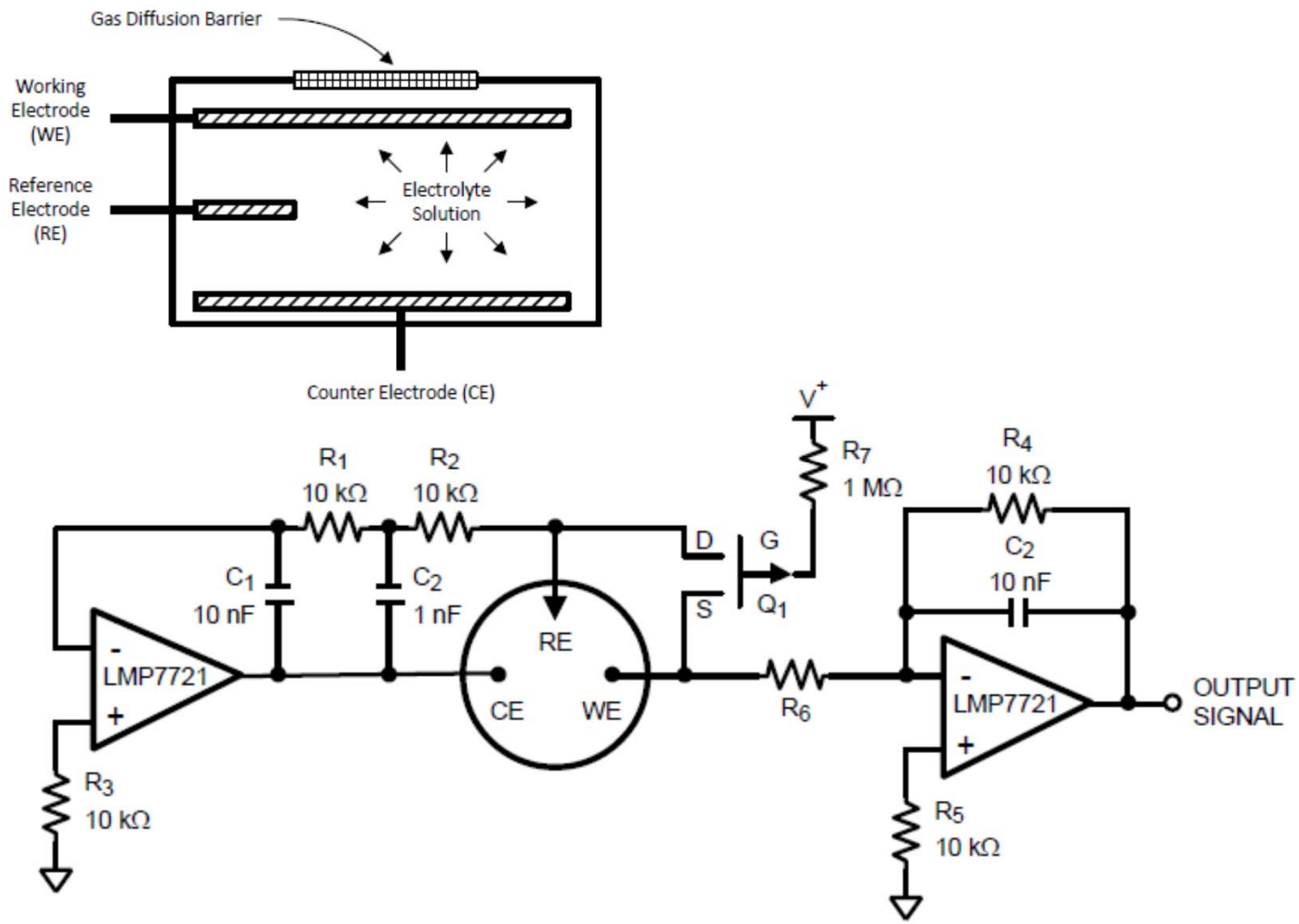
نمونه مدار Potentiostat



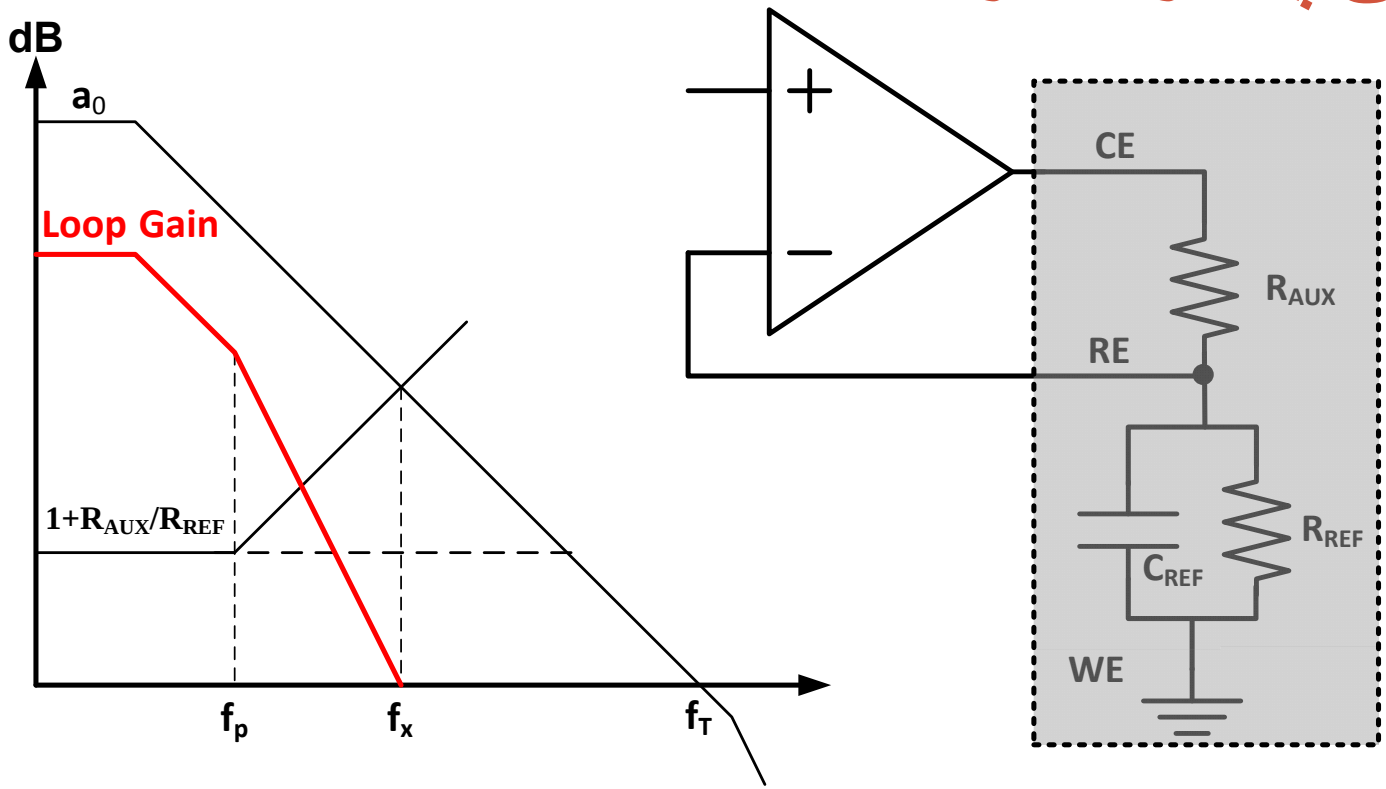
$$V_{OUT} = A \cdot I_{CELL} \cdot R$$

- مدار Potentiostat با تقویت کننده ابزار دقیق جهت تبدیل جریان به ولتاژ
- WE در پتانسیل «صفر» بوسیله زمین حقیقی
- نیاز به آپ-امپ و تقویت کننده ابزار دقیق با جریان بایاس کم

مدار پیشنهادی TI برای سنسور گاز الکتروشیمیایی

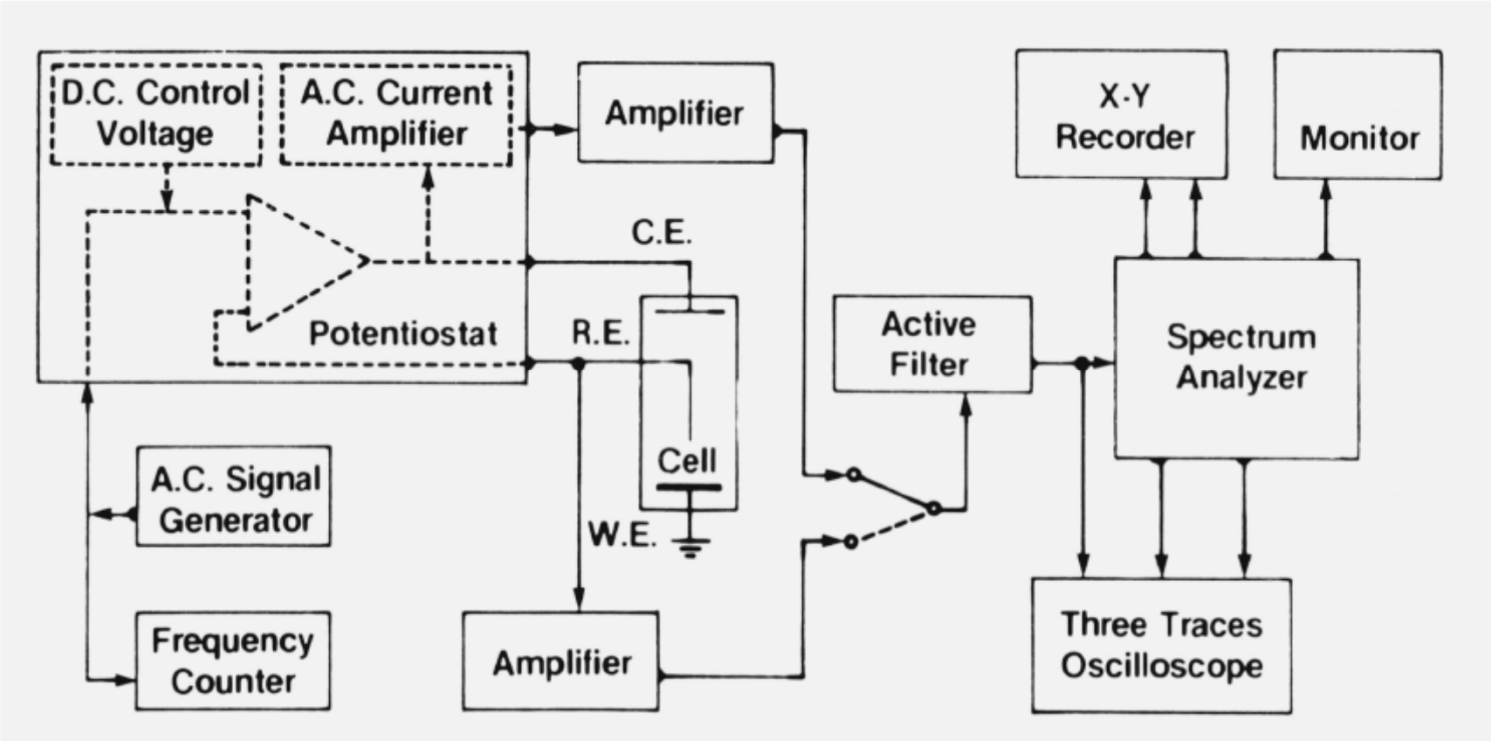


بررسی پایداری در Potentiostat



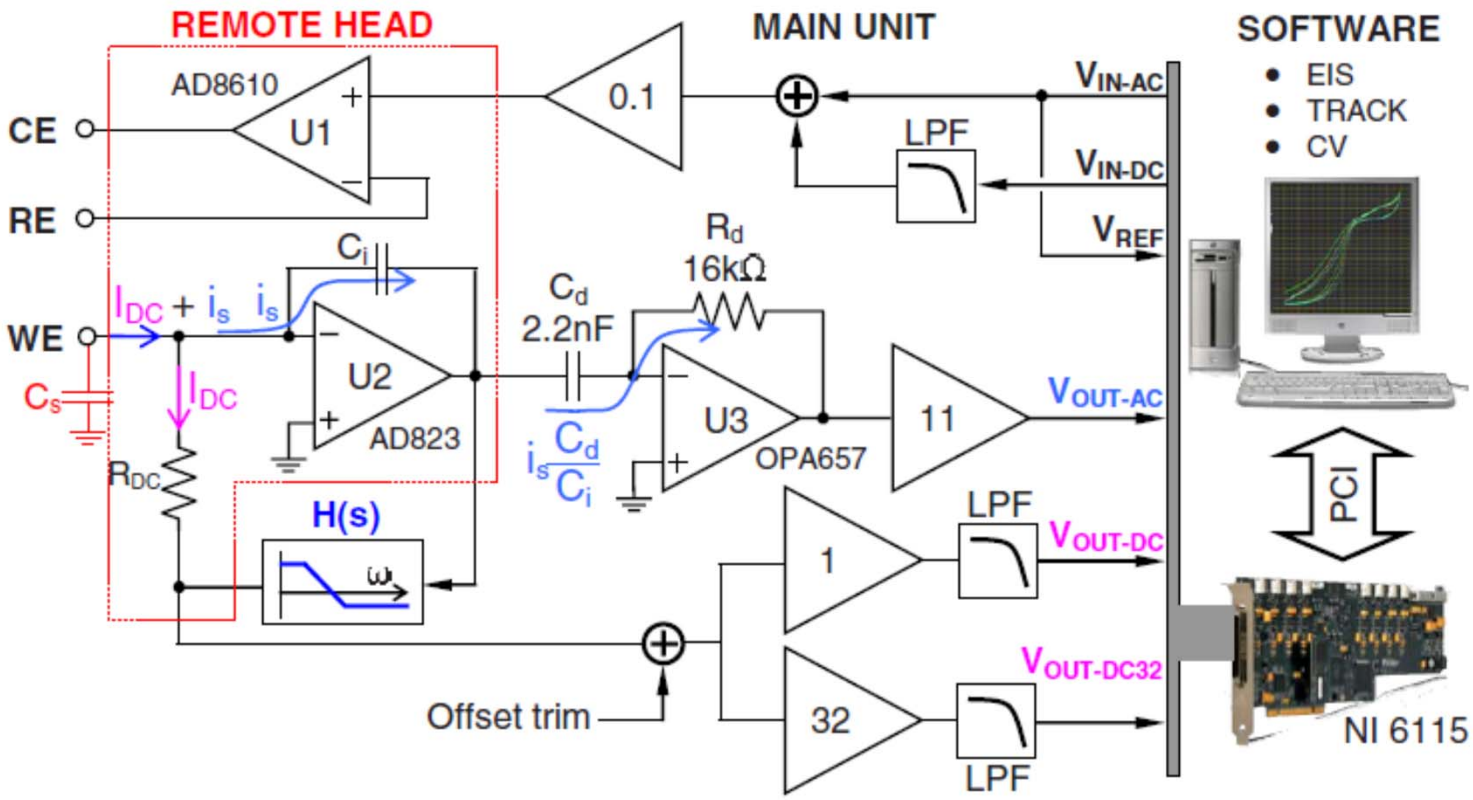
- قطب در ضریب فیدبک: امکان ناپایداری در صورت بزرگ بودن خازن
- $f_p = \frac{1}{(R_{REF}||R_{AUX})C_{REF}}$
- نامشخص یا متغیر بودن پارامتر های ضریب فیدبک
- امکان جبرانسازی بیرونی (lead)

درایو Potentiostat با ولتاژ AC



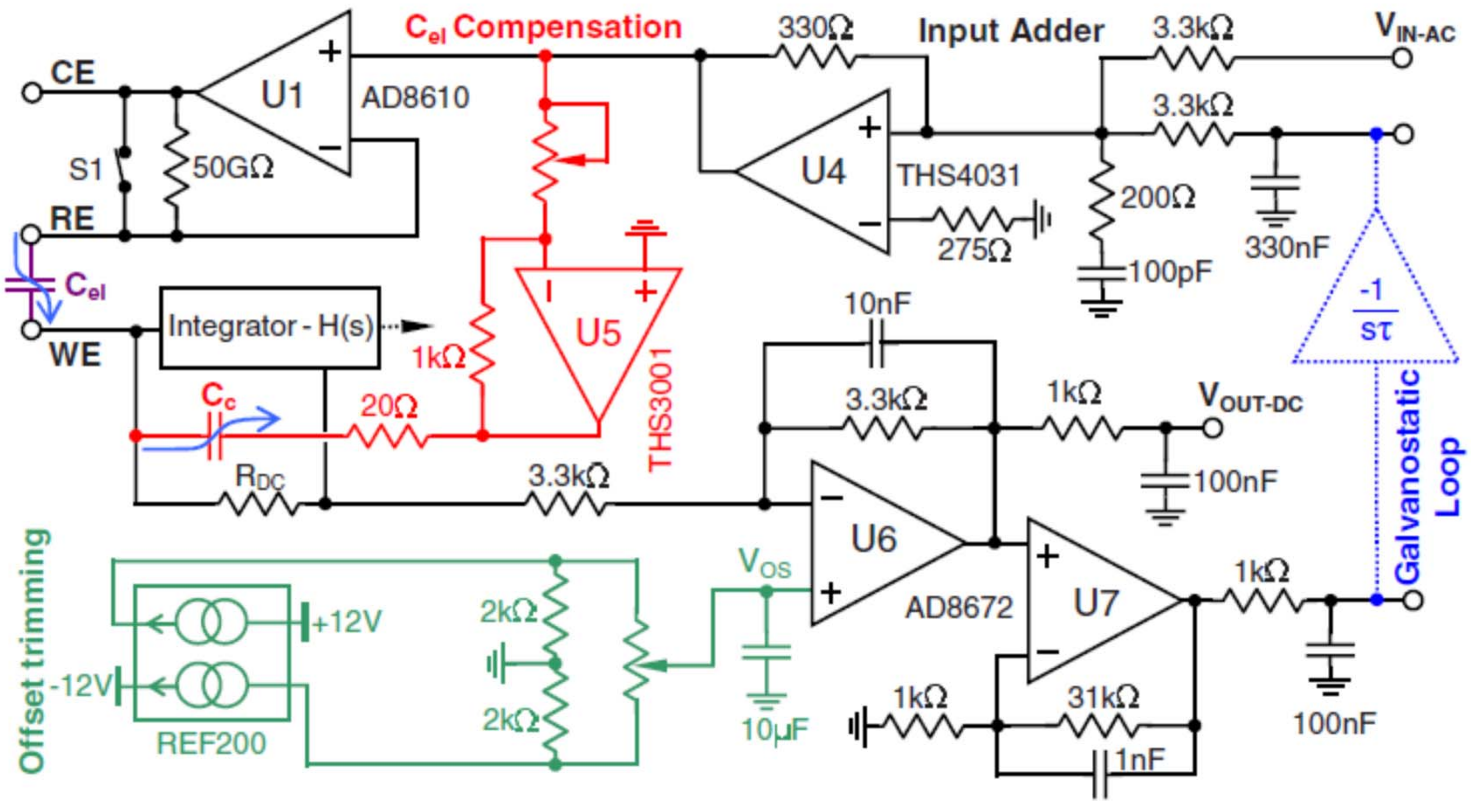
- اعمال ولتاژ AC بر روی DC و اندازه گیری جریان AC
- محدوده فرکانس کمتر از 1MHz

درایو Potentiostat با ولتاژ AC



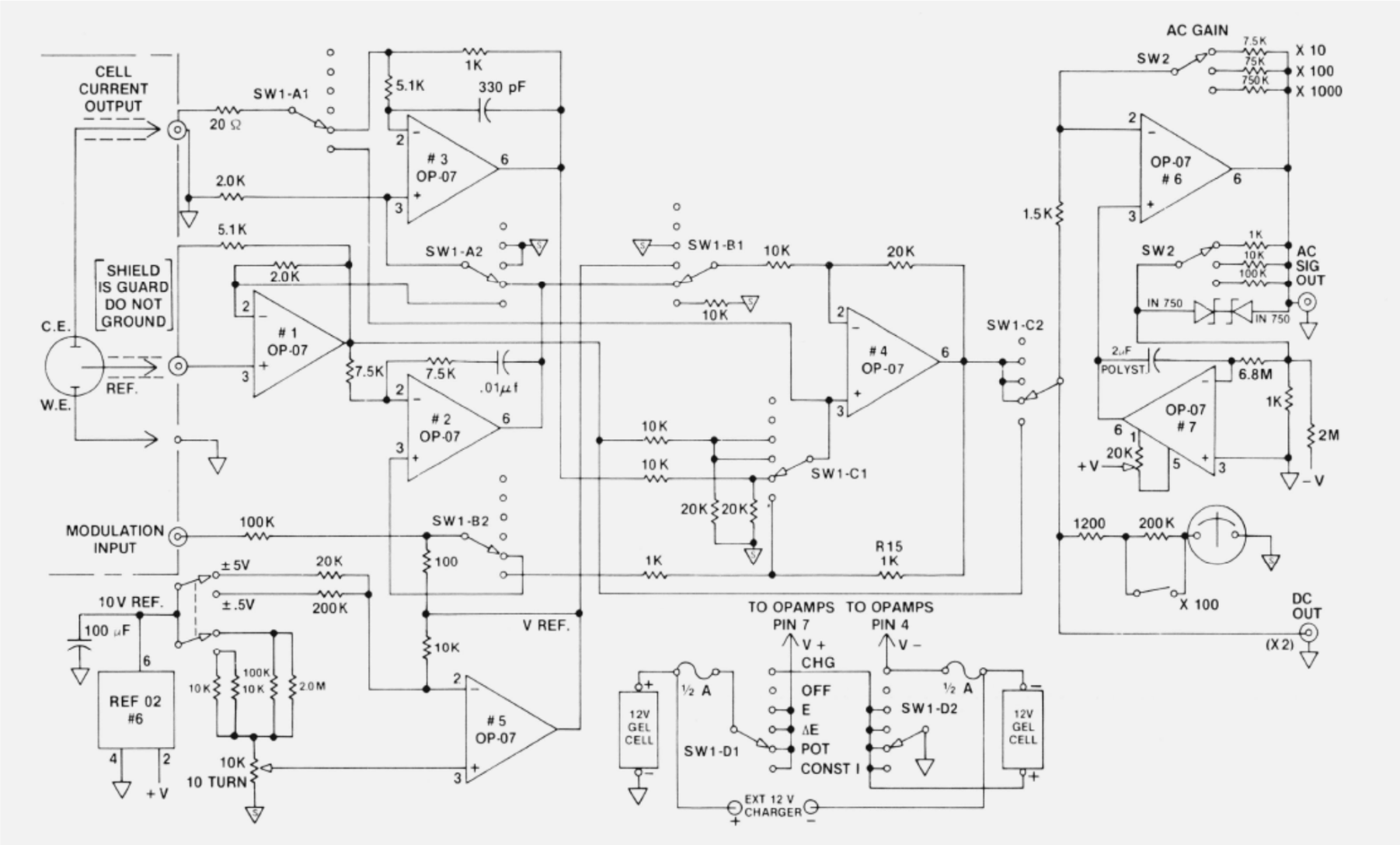
- نمونه سیستم potentiostat AC-DC (مقاله 2009)

درایو Potentiostat با ولتاژ AC



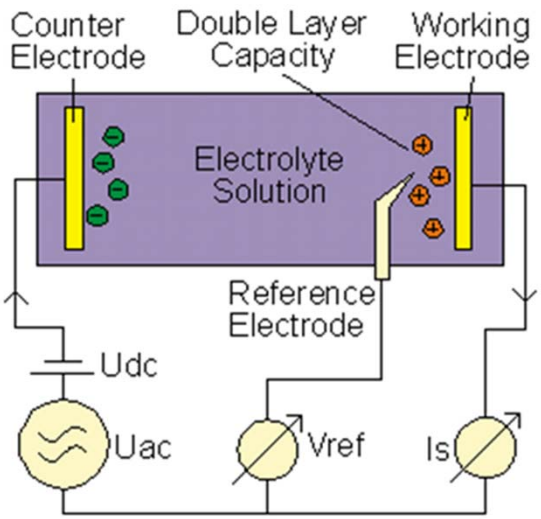
- نمونه سیستم potentiostat AC-DC (مقاله 2009)

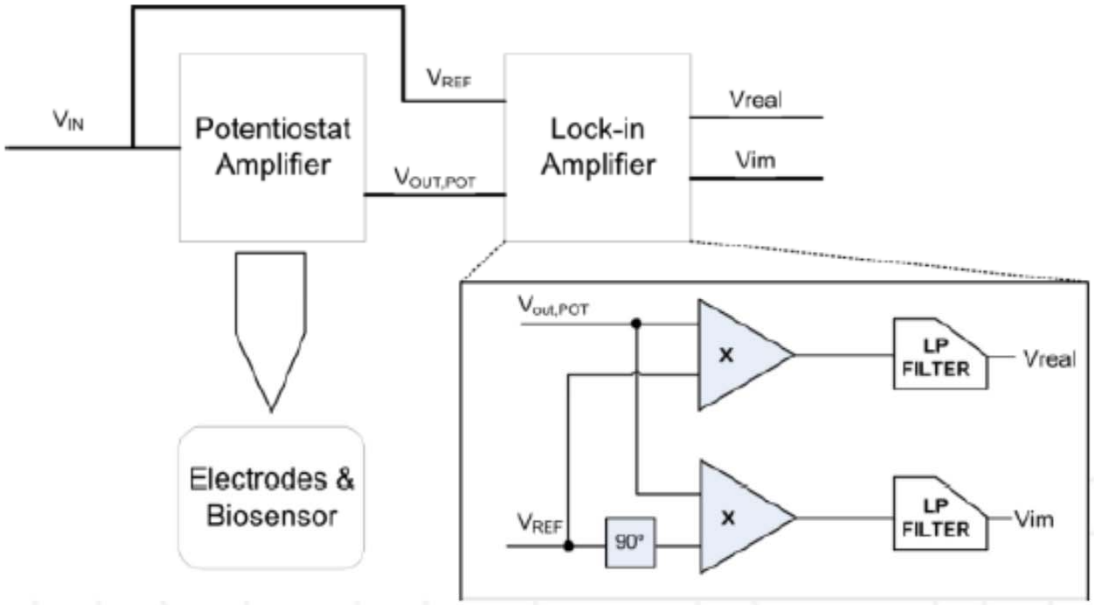
نمونه مدار potentiostat از نوع AC-DC



- طراحی و استفاده در اداره ملی استاندارد آمریکا (1980)

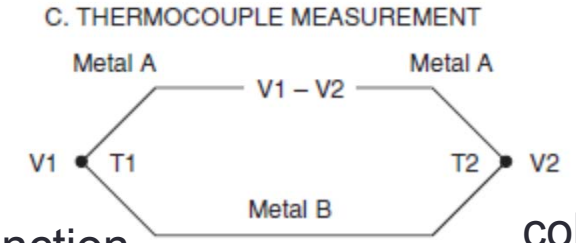
امپدانس سنجی با Potentiostat





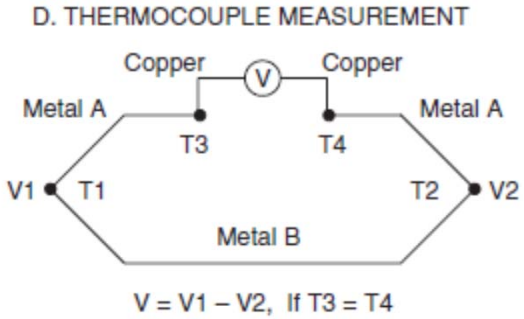
- امکان طیف سنجی امپدانسی با درایو Potentiostat با ولتاژ AC

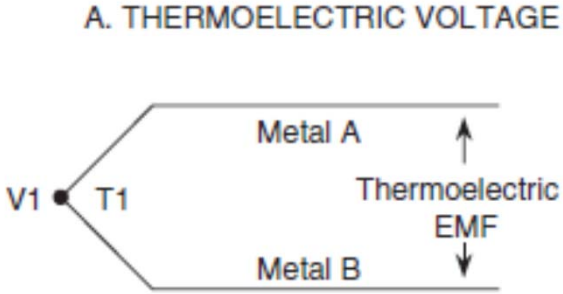
ترموکوپل



Hot junction

cold junction





ترموکوپل در عمل: V1-V2=f(T1-T2)

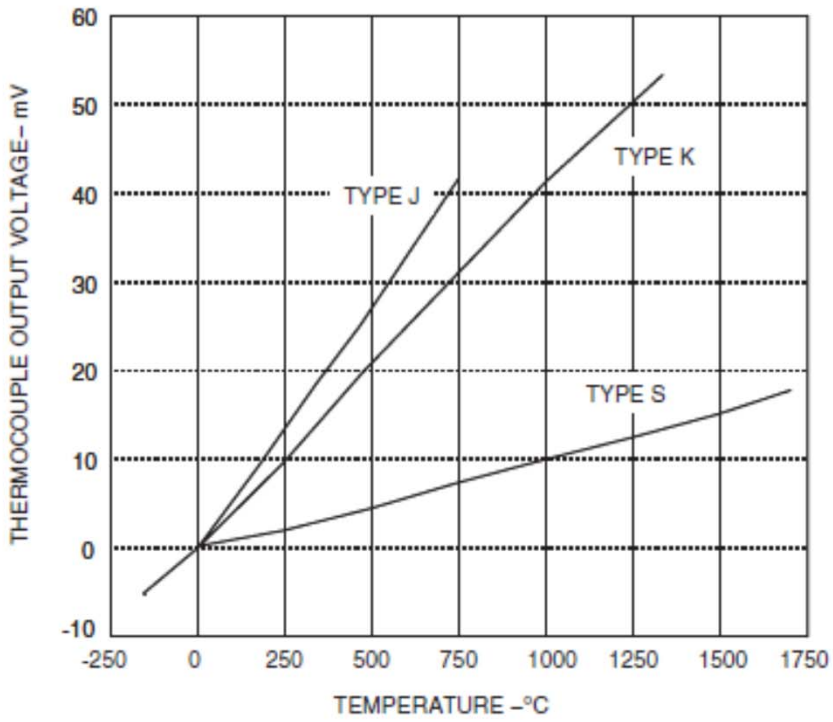
ترموکوپل در تئوری: V1=f(T1)

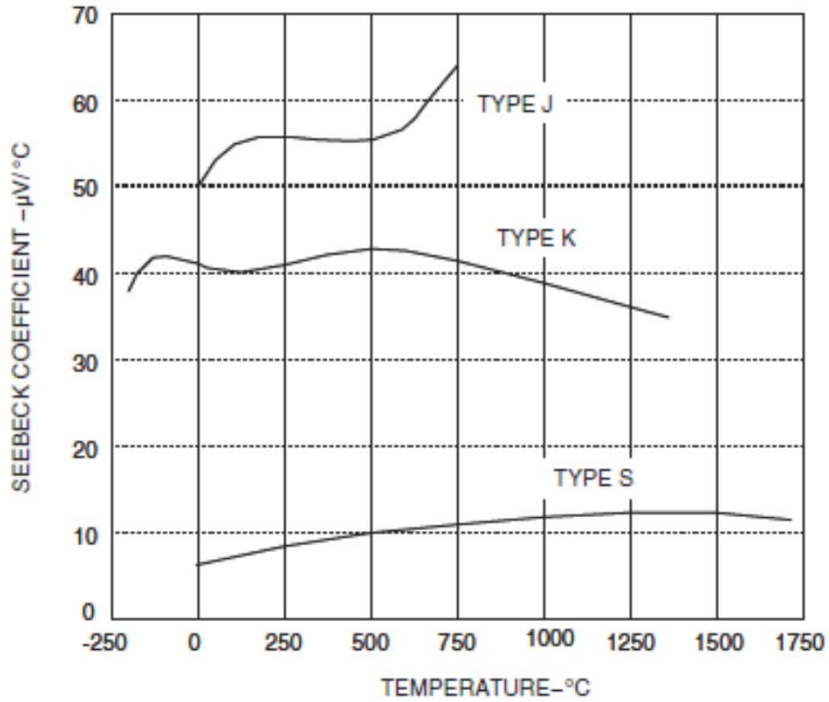
- ترموکوپل
  - مشخصه غیر خطی ← نیاز به Look-up Table
  - محدوده عملکرد بسیار وسیع -200 تا 2000
  - حساسیت بسیار کم: کمتر از 0.1mV/°C
- نیاز به مشخص بودن دمای اتصال سرد (cold junction)

مشخصه های ترموکوپل

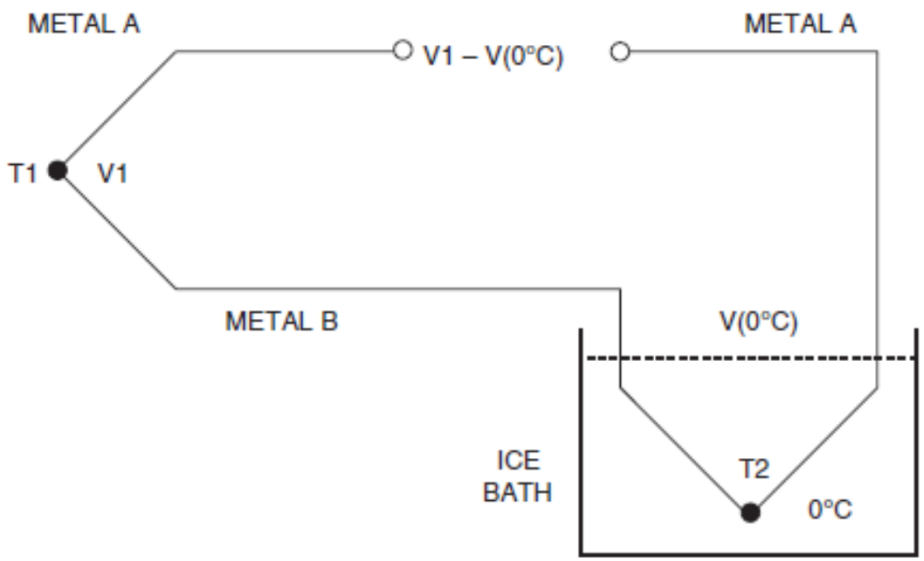
JUNCTION MATERIALS	TYPICAL USEFUL RANGE (°C)	NOMINAL SENSITIVITY (μV/°C)	ANSI DESIGNATION
Platinum (6%)/ Rhodium-Platinum (30%)/Rhodium	38 to 1800	7.7	B
Tungsten (5%)/Rhenium-Tungsten (26%)/Rhenium	0 to 2300	16	C
Chromel-Constantan	0 to 982	76	E
Iron-Constantan	0 to 760	55	E
Chromel-Alumel	−184 to 1260	39	K
Platinum (13%)/Rhodium-Platinum	0 to 1593	11.7	R
Platinum (10%)/Rhodium-Platinum	0 to 1538	10.4	S
Copper-Constantan	−184 to 400	45	T

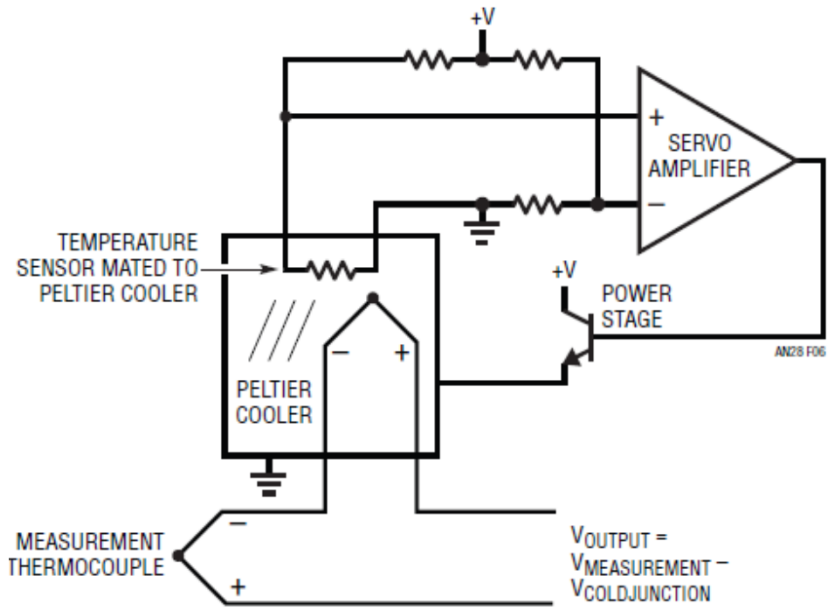
مشخصه های ترموکوپل





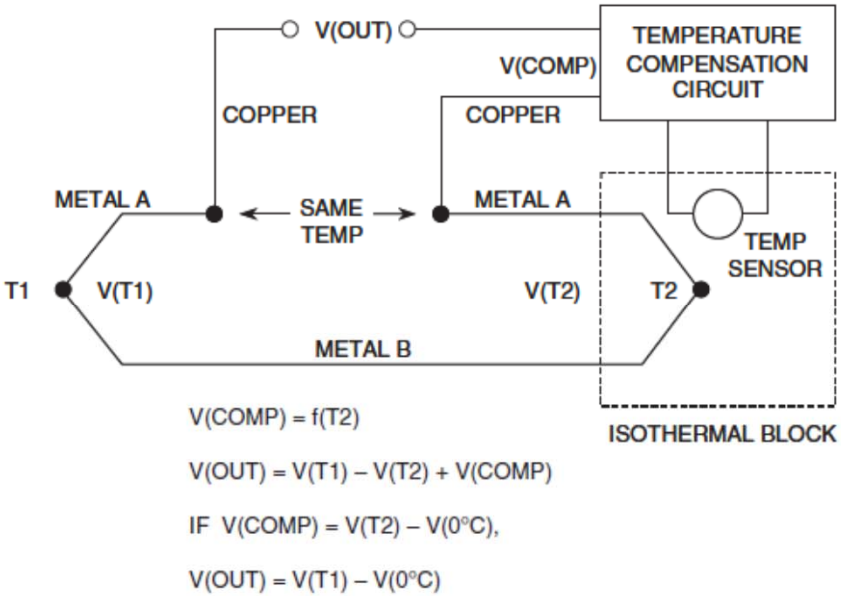
تنظیم (تثبیت) دمای اتصال سرد در ترموکوپل

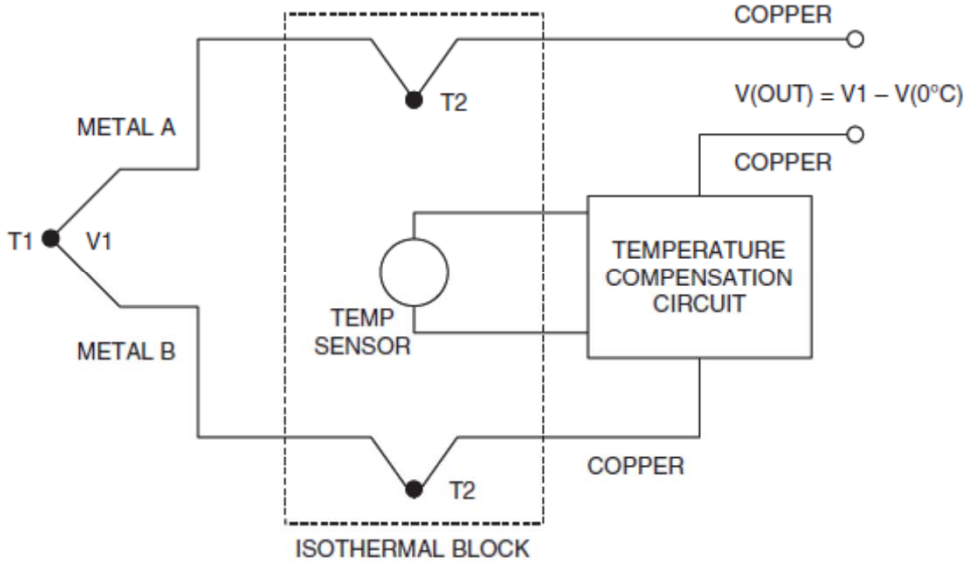




- استفاده از دمای نقطه ذوب یخ (صفر درجه) به عنوان دمای مرجع در اتصال سرد
- دقت بالا: کاربرد در استاندارد سازی
- غیر عملی در کاربرد های عملی و صنعتی
- امکان استفاده از سرد کننده TEC برای تولید دمای صفر درجه
  - هزینه بالا
  - نیاز به مدار کنترلر
  - توان مصرفی بالا

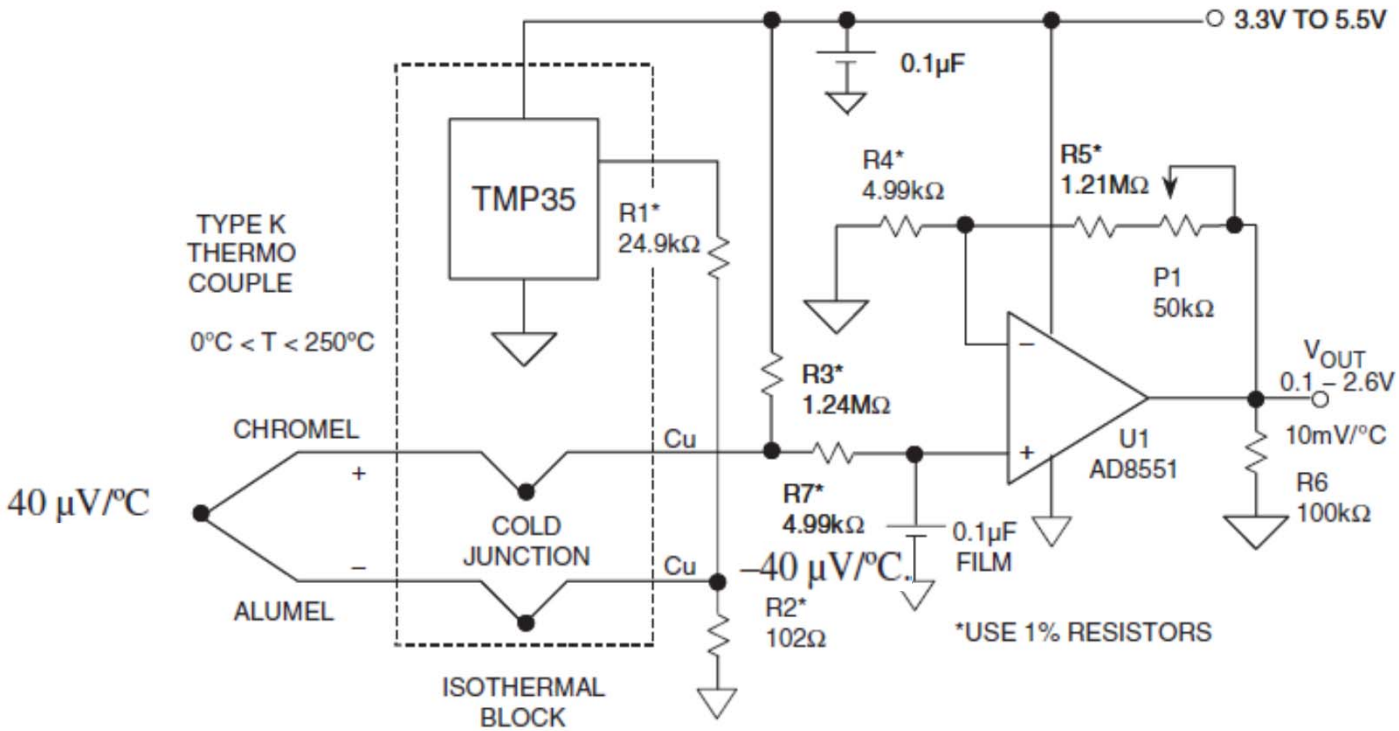
تصحیح دمای اتصال سرد در ترموکوپل





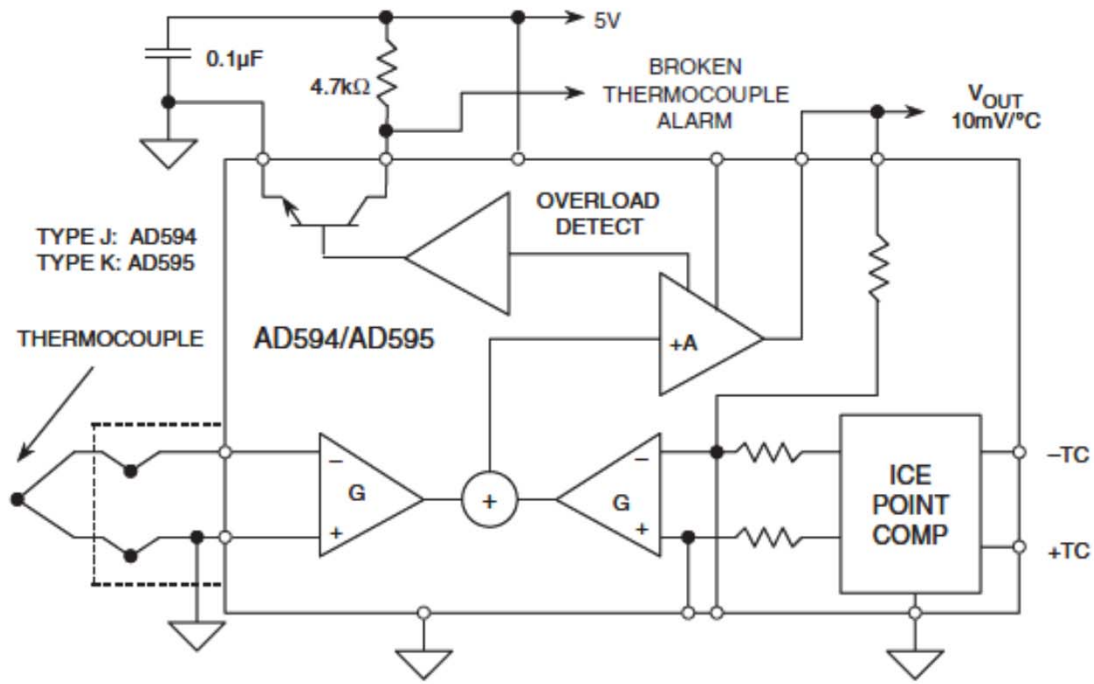
- استفاده از یک سنسور دما جهت اندازه گیری اتصال سرد (دمای محیط)
- تصحیح دمای قرائت شده از ترموکوپل
- محدوده تغییرات دمای کم سنسور دمای تصحیح
- عدم نیاز به دقت بالای سنسور دمای تصحیح

نمونه مدار واسط ترموکوپل



- استفاده از سنسور دمای TMP35 برای تولید ضریب حرارتی –40 µV/°C.
- بهره ولتاژ 250: آپ-امپ BJT با آفست و دریفت بسیار کوچک (chopper stabilized)

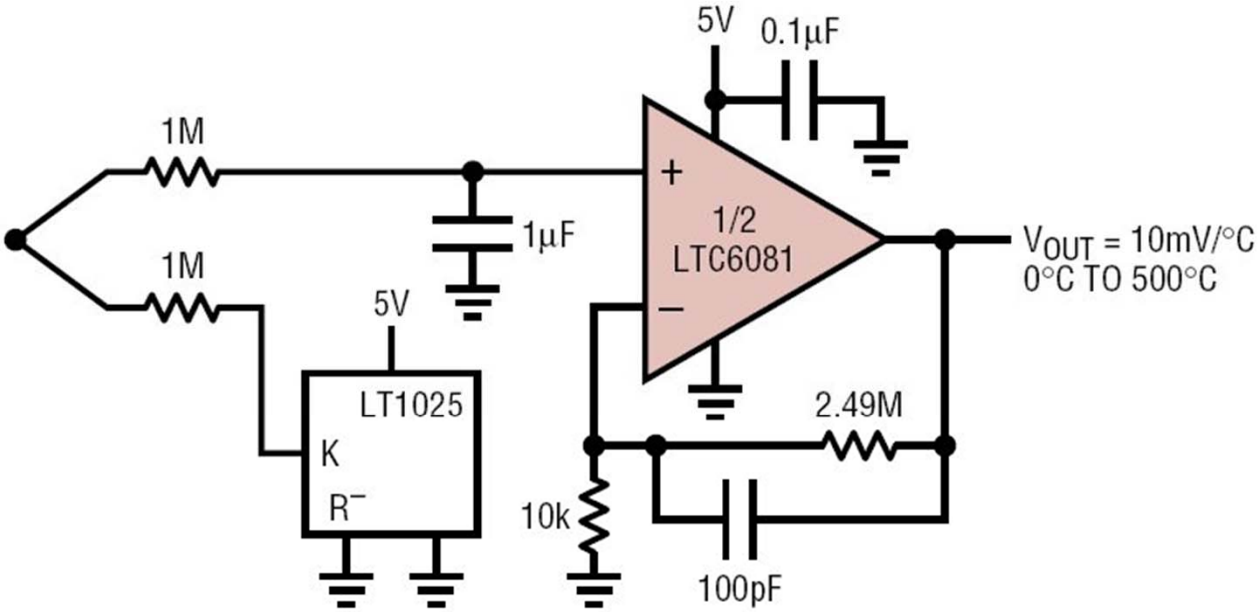
IC مخصوص اندازه گیری ترموکوپل



FEATURES
Pretrimmed for Type J (AD594) or Type K (AD595) Thermocouples
Can Be Used with Type T Thermocouple Inputs
Low Impedance Voltage Output: 10 mV/°C
Built-In Ice Point Compensation
Wide Power Supply Range: +5 V to ±15 V
Low Power: <1 mW typical
Thermocouple Failure Alarm
Laser Wafer Trimmed to 1°C Calibration Accuracy

- دارای دماسنج داخلی

IC مخصوص اندازه گیری ترموکوپل



SENSOR: OMEGA 5TC-TT-K-30-36 K-TYPE THERMOCOUPLE
1M RESISTORS PROTECT CIRCUIT TO ±350V WITH NO PHASE REVERSAL OF AMPLIFIER OUTPUT
1pA MAX I_{BIAS} TRANSLATES TO 0.05°C ERROR
20µV V_{OS} → 0.5°C OFFSET

60812 TA05

- IC :LT1025 مخصوص تنضیم کننده دمای صفر
  - دما سنج داخلی و تولید ولتاژ برای شبیه سازی دمای صفر