



**Prof.dr.sc. Vedran Bilas**

# **Osnove elektroničkih mjerenja i instrumentacije**

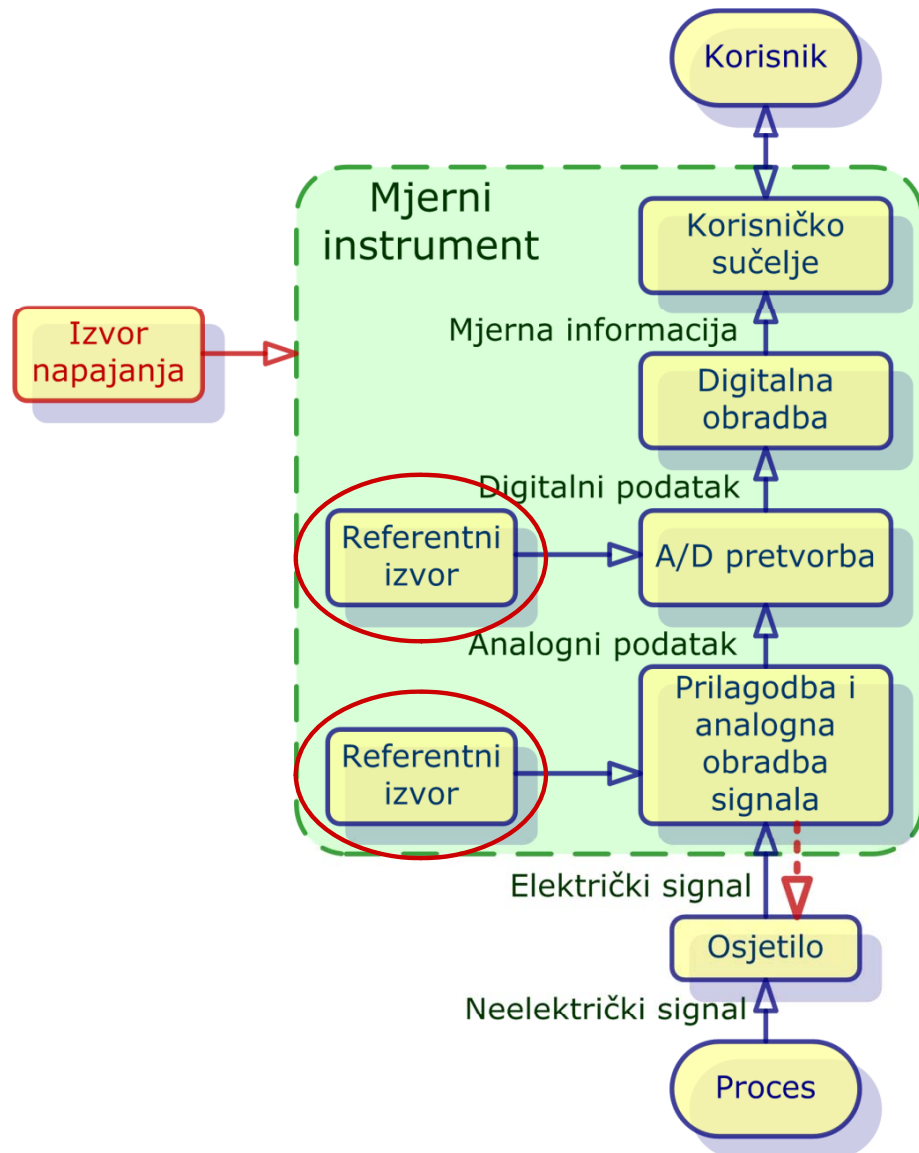
## **P9 – Izvori referentnog napona**

# Sadržaj

---

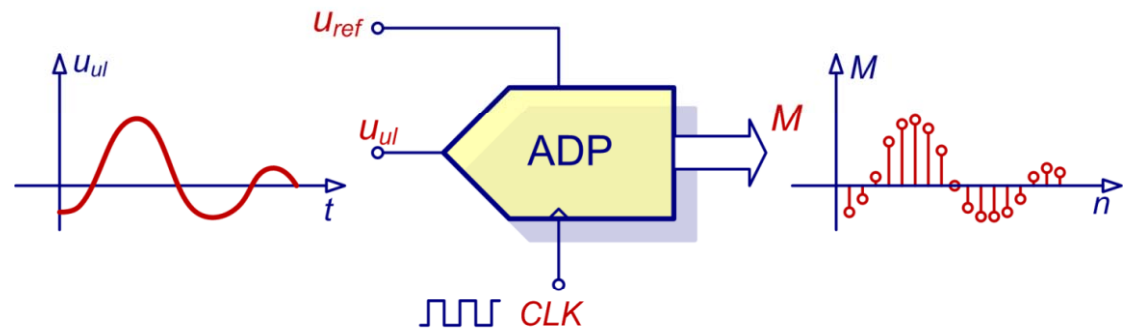
- Primjena izvora referentnog napona (IRN)
- Spajanje izvora referentnog napona
- Značajke izvora referentnog napona
- Ukupna pogreška i odabir izvora referentnog napona
- Tehnologije izvora referentnog napona (Zener, *bandgap*)
- Usporedba izvora referentnog napona, tipični primjeri

# Primjena izvora referentnog napona



- Elektronički mjerni lanac - funkcijske cjeline
- Izvor referentnog napona (IRN) – usporedba s mjernim naponom

- Čvrsta točka u AD/DA pretvorbi

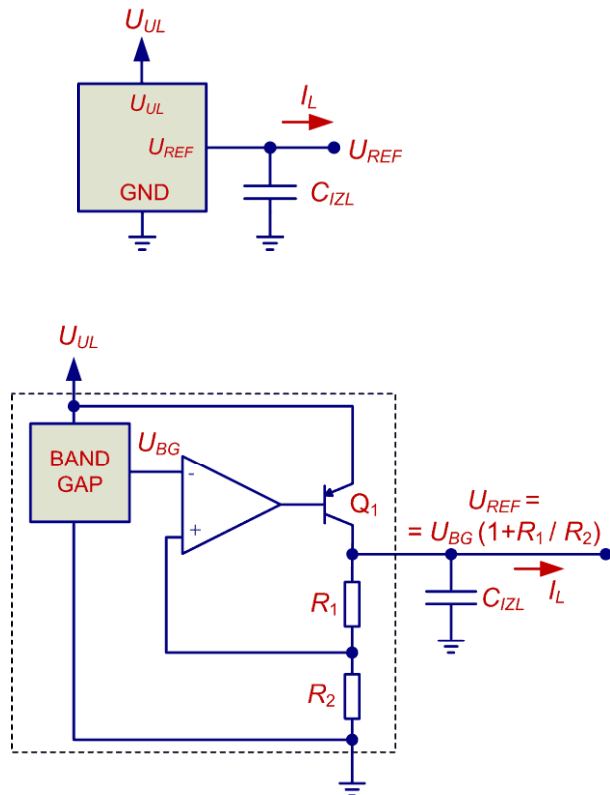


- Dijelovi naponskih regulatora

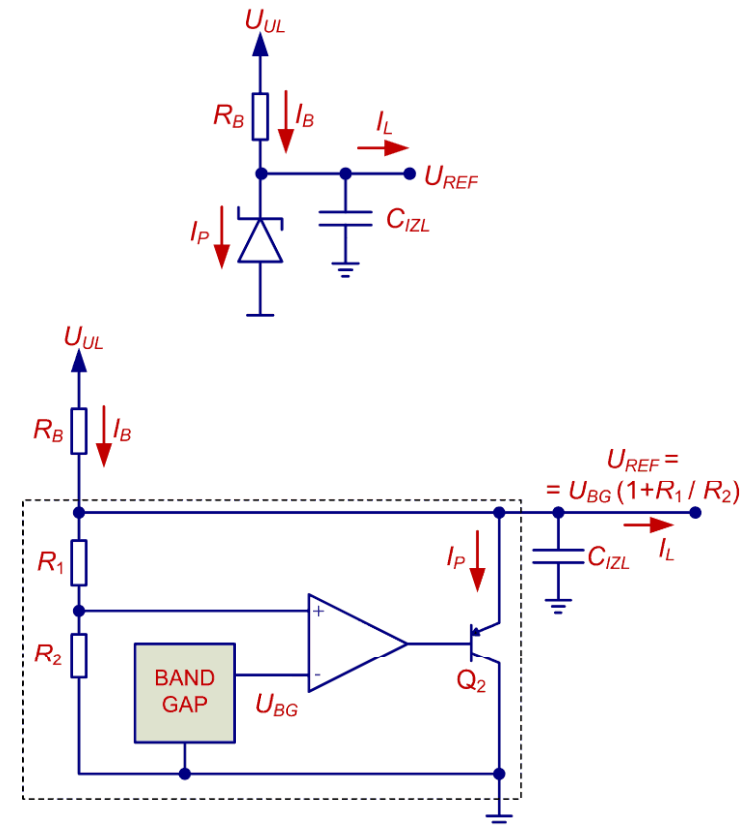
# Spajanje izvora referentnog napona - 1

➤ Izvori referentnog napona mogu se spojiti kao

- **Serijski** (*series reference*)



- **Paralelni** (*shunt reference*)



# Spajanje izvora referentnog napona - 2

---

## ➤ Osnovne razlike u radu

- Regulacija napona na izlazu naponom serijskog tranzistora ili odvodnjom viška struje paralelnim tranzistorom
- Serijski IRN troše manje struje (daju struju kad je potrebna)
- Paralelni IRN troše ukupnu struju trošila i struju reference
- Za male struje izlaza ( $100\mu\text{A}$ ) razlika nije značajna
- Paralelni IRN omogućuju veću fleksibilnost dizajna (raspon ulaznog napona, dobivanje negativnih napona ili plivajuće reference)
- Serijski IRN se može isključiti

# Značajke izvora referentnog napona

---

- Temperaturni koeficijent
- Točnost napona
- Šum
- Termička histereza
- Dugotrajna stabilnost
- Regulacija s promjenom opterećenja
- Regulacija s promjenom napajanja
- Radni napon
- Potrošnja

# Temperaturni koeficijent IRN

---

- Promjena  $U_{REF}$  s temperaturom izražava se preko **temperaturnog koeficijenta** (TC) u ppm/°C
  - Raspon 1-100 ppm/°C
  - Temperaturna ovisnost (u pravilu) nije linearna
  - Pri proizvodnji se korigiraju doprinosi višega reda
- Specificira se za temperaturno područje rada komponente (0 do 70°C, -40 do 85°C, -40 do 125°C)
- TC se najčešće izračunava iz razlike najvećeg i najmanjeg napona IRN izmjerenih unutar danog temperaturnog područja

# Točnost napona IRN

---

- IRN ima deklarirani nominalni napon
- Podatak o točnosti pokazuje koliko se stvarni napon IRN razlikuje od nominalnog pri sobnoj temperaturi i zadanim uvjetima napajanja
- Tipično se zadaje u postocima
  - Raspon vrijednosti 0,01-1%
- Pogreška IRN popravljiva se umjeravanjem sustava



# Šum IRN

---

- **Šum** IRN uzrokuje smanjenje SNR analogno-digitalne pretvorbe (smanjenje efektivne razlučivosti)
- **Visokofrekvencijski šum** definira se efektivnom vrijednošću napona za frekvencijsko područje 10Hz – 10kHz
  - Utjecaj širokopoasnog šuma ovisi o frekvencijskom pojasu korisnog signala
  - Širokopoasni šum je **u pravilu manji problem** kod IRN, može se filtrirati
- **Niskofrekvencijski šum** definira se vrijednošću od vrha do vrha napona šuma u frekvencijskom pojasu 0,1-10Hz
  - Niskofrekvencijski šum je uglavnom 1/f tipa
  - Filtriranje napona ispod 10Hz nepraktično  $\Rightarrow$  NF šum izravno doprinosi ukupnoj pogrešci pretvorbe
  - IRN bez ugrađenog pojačala imaju manji NF šum

# Termička histereza IRN

---

- **Termička histereza** - pomak u vrijednosti referentnog napona koji nastaje zbog jednog ili više termičkih ciklusa
  - Izražava se u ppm
  - Proizvođači određuju "tipičnu" vrijednost
  - Ne provjerava se u proizvodnji
- Termički ciklus definira se kao promjena temperature od sobne do najniže, pa do najviše radne temperature i konačno natrag do sobne temperature
- Iako sama aplikacija nema veliki raspon temperatura, pregrijavanje može nastati kod ugradnje (lemljenja)
- Promjene napona izazvane su mehaničkim naprezanjima poluvodičke pločice u čipu, naprezanjima kućišta i tiskanih pločica
- Komponente u **većim kućištima** imaju u pravilu manju termičku histerezu

# Dugotrajna stabilnost IRN

---

- **Dugotrajna stabilnost** pokazuje promjenu napona IRN nakon 1000 sati (6 tjedana) kontinuiranog rada pod nominalnim uvjetima
  - Gruba procjena stabilnosti napona kroz radni vijek sklopa
  - Većina promjene dogodi se u prvih 1000 sati, jer se dugotrajna stabilnost mijenja logaritmički s vremenom
  - Ne provjerava se u proizvodnji
- Mehanička naprezanja izazivaju pomak referentnog napona (voditi računa o izboru kućišta i položaju na PCB)

# Regulacija napona IRN

---

- Regulacija izlaznog napona IRN definira se
  - u odnosu na promjenu struje opterećenja – **strujna regulacija** (*load regulation*)
  - u odnosu na promjenu napona napajanja IRN – **naponska regulacija** (*line regulation*)

# Radni napon i potrošnja IRN

---

- U slučajevima kada je **potrošnja** kritičan parametar obično je bolji izbor serijski IRN
  - Tipične mirne struje od  $25\mu\text{A}$  do  $250\mu\text{A}$ , najmanje oko  $1\mu\text{A}$
  - **Smanjenje struje** ima za posljedicu smanjenje preciznosti (porast TC i netočnosti) i porast šuma
  - Serijski IRN imaju mogućnost isključivanja i time smanjenja potrošnje
- Serijskei IRN mogu raditi s vrlo malim **razlikama napona ulaza i izlaza** (*dropout*), reda  $200\text{mV}$
- Kod paralelnih je problem da mala razlika napona traži mali serijski otpor, a to za posljedicu ima veliku promjenu struje s promjenom ulaznog napona
- IRN se često koriste u impulsnom režimu, važno da imaju odgovarajući kondenzator

# Odabir IRN

---

## ➤ Odabir IRN prema kriterijima aplikacije

- Nominalni  $U_{REF}$
- Raspon ulaznog napona (napajanja)
- Izlazna struja
- Potrošnja
- Veličina kućišta

## ➤ Sljedeći kriterij

### • Točnost AD pretvorbe

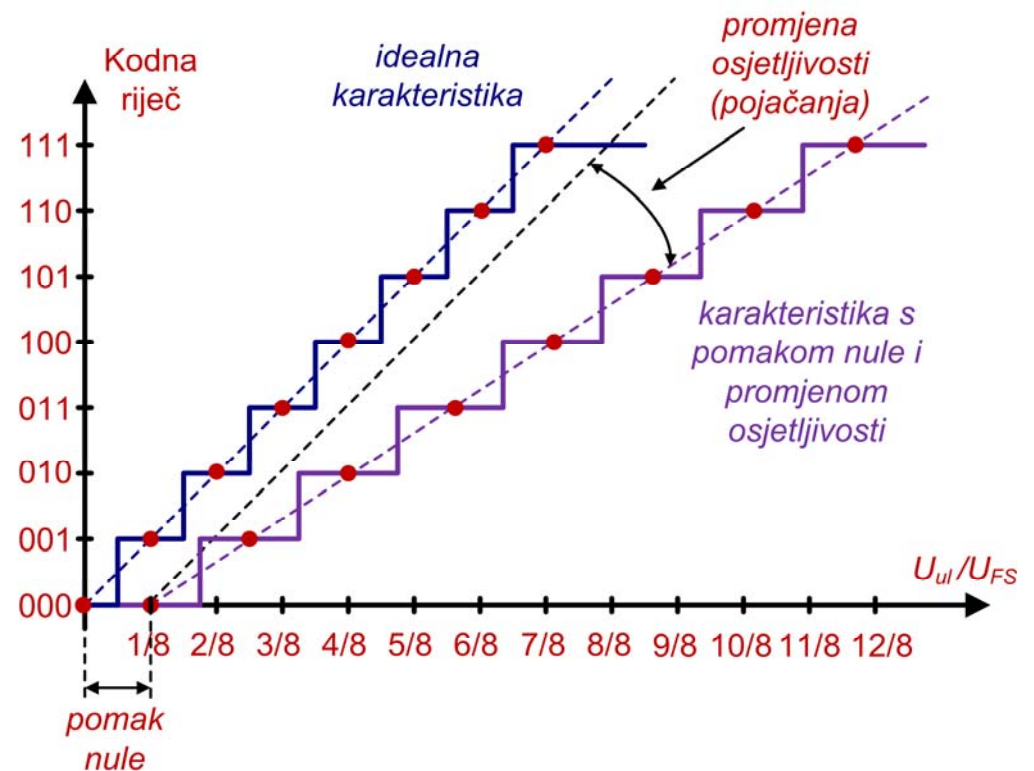
- Točnost AD pretvorbe – mjerenje u LSB
- Pretvorba LSB – ppm

$$LSB(ppm) = 10^6 \left( \frac{1}{2} \right)^n$$

- 8 bita ~ 3906ppm, 10 bita ~ 977ppm, 16 bita ~ 15ppm

# Točnost AD pretvorbe

- Pogreška referentnog napona ima za posljedicu pogrešku pojačanja (osjetljivosti) ADP
- Može prouzročiti gubitak dinamičkog područja za ulazne signale blizu napona pune skale
- Pogreška je najveća na gornjem rubu prijenosne karakteristike
- Pri odabiru IRN, dobro je ocijeniti dozvoljenu pogrešku preko najveće pogreške pojačanja



# Ukupna pogreška IRN – 1

- **Konzervativna procjena** (zbroy pojedinačnih vrijednosti) ili efektivna vrijednost uz pretpostavku statističke neovisnosti
- Kod nekih pogrešaka **jamči se najveća vrijednost** (TC, inicijalna točnost, naponska i strujna regulacija)
- **Procjena pogreške za najgori slučaj,  $p_{garan}$** 
  - TC u najvećem broju slučajeva dominira nad ostalim pogreškama

$$p_{temp} = TC(T_{max} - T_{min})$$

$$p_{load} = load\_reg(I_{load\ max} - I_{load\ min})$$

$$p_{line} = line\_reg(U_{in\ max} - U_{in\ min})$$

$$p_{garan} = p_{in\_acc} + p_{temp} + p_{load} + p_{line}$$



# Ukupna pogreška IRN – 2

- Ostale pogreške dane su kao “**tipične**” vrijednosti (šum, termička histereza, dugotrajna stabilnost)
- **Najgori slučaj** za histerezu i stabilnost određuje se množenjem tipične vrijednosti s 3(4)
- Utjecaj NF šuma (0,1 do 10Hz) određuje se uz pretpostavku da se  $U_{REF}$  u 10 sekundi promjeni za vrijednost šuma od vrha do vrha
  - Pogrešku u ppm treba pretvoriti u LSB za dani ADP

$$p_{therm\_hist} \approx 3(tip\_therm\_hist)$$

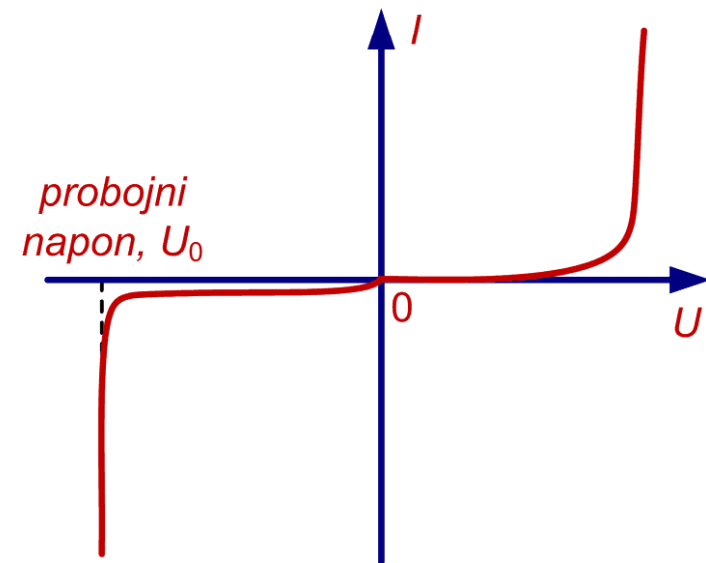
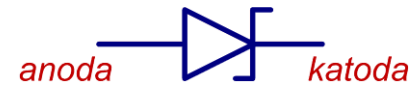
$$p_{longterm\_stab} \approx 3(tip\_longterm\_stab)$$

$$p_{LF\_noise} \approx 10^6 \left( \frac{U_{noise\_pp}(0,1-10Hz)}{U_{REF}} \right)$$

$$p_{tot} \approx p_{garan} + p_{therm\_hist} + p_{longterm\_stab} + p_{LF\_noise}$$

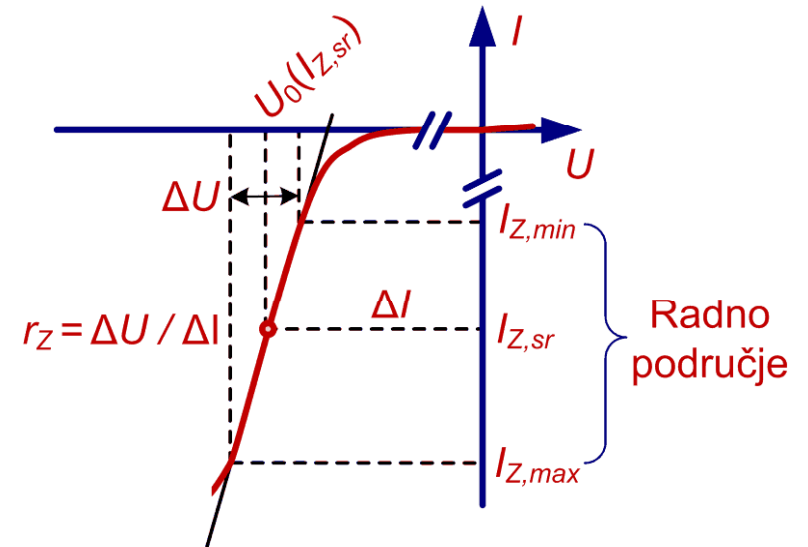
# IRN sa Zener diodom – 1

- **Zener dioda** radi u području proboja (zaporna polarizacija)
  - Tunelski proboj ( $<5V$ )
  - Lavinski proboj ( $>5V$ )
- Struktura diode slična signalnoj diodi, razlika u koncentraciji primjesa
- **Probojni napon** ovisi o otpornosti pn spoja (koncentraciji primjesa)
  - Kod komercijalnih dioda u rasponu 2-200V, tolerancije 5%
- **Snaga** u rasponu 0,25W-50W



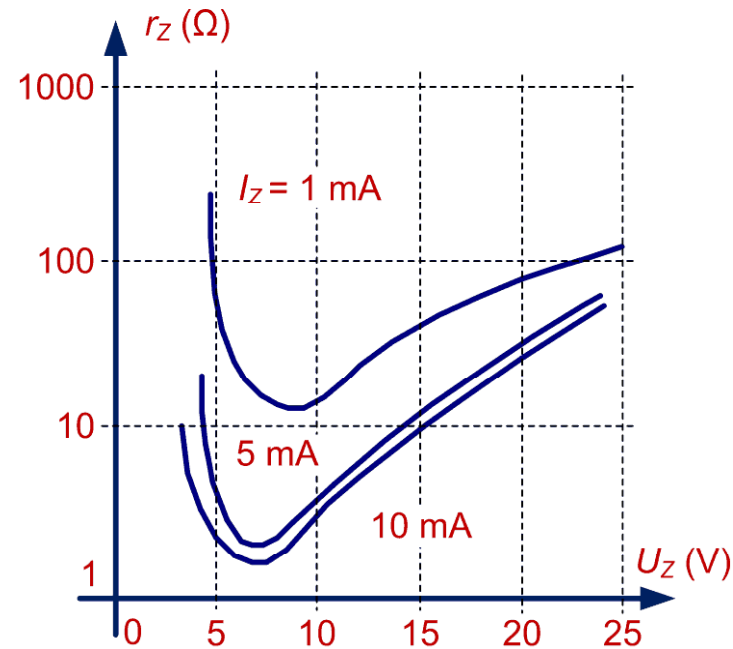
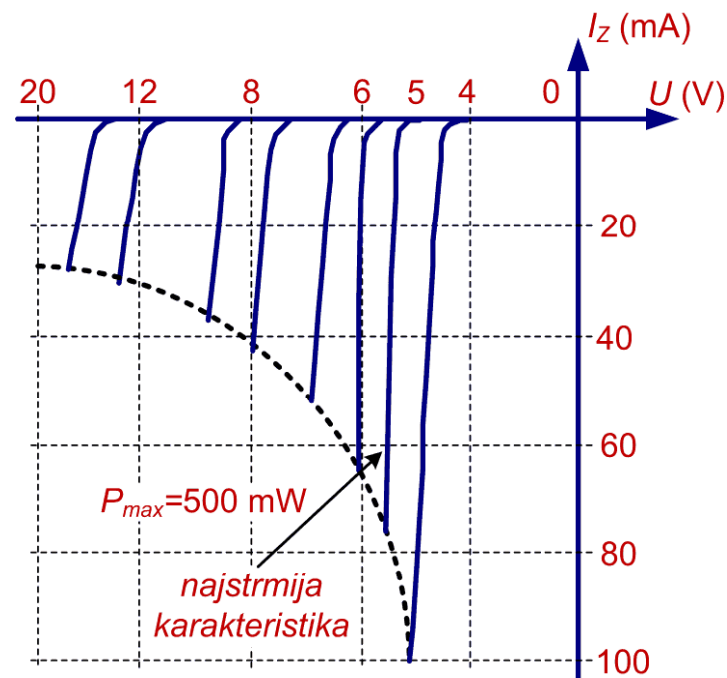
# IRN sa Zener diodom – 2

- “Dobra” Zener dioda
  - Mala reverzna struja do proboja
  - Mala promjena napona sa strujom nakon proboja
- Minimalna radna struja
  - Određena stabilnošću napona
- Maksimalna radna struja
  - Određena dozvoljenom disipacijom snage na diodi
- Dinamički otpor Zener diode
  - $r_z = \Delta u_z / \Delta i_z$
  - Ovisi o radnoj točki
  - Specificira se za struju na sredini radnog područja



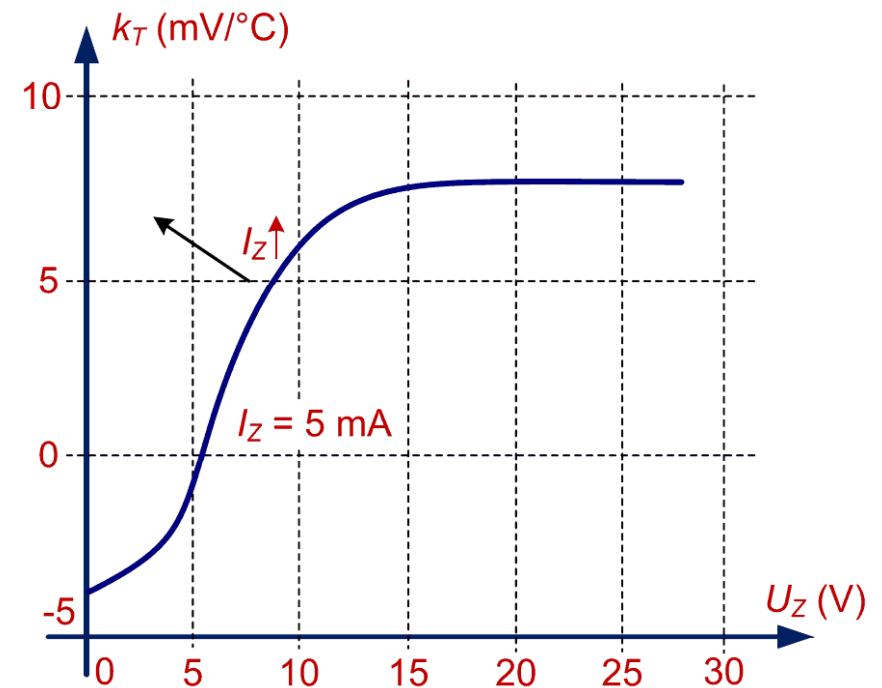
# IRN sa Zener diodom – 3

- **Strmina karakteristike** (dinamički otpor) ovisi o radnom naponu (koncentraciji primjese)
  - **Dinamički otpor je najmanji oko probojnog napona 5V**



# IRN sa Zener diodom – 4

- Porastom temperature probojni napon
  - pada za  $U_z < 5V$  (tunelski proboj)
  - raste za  $U_z > 5V$  (lavinski proboj)
- Temperaturni koeficijent (TC) Zenerovog napona
  - $k_T = \Delta U_z / \Delta T$



# IRN sa Zener diodom – 5

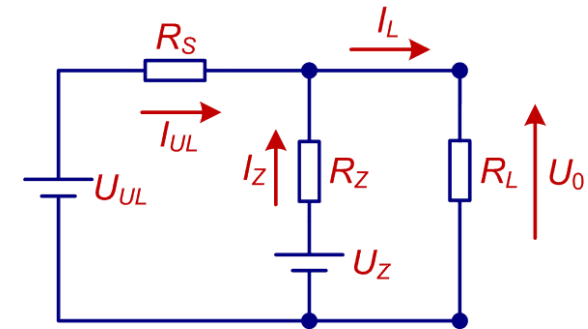
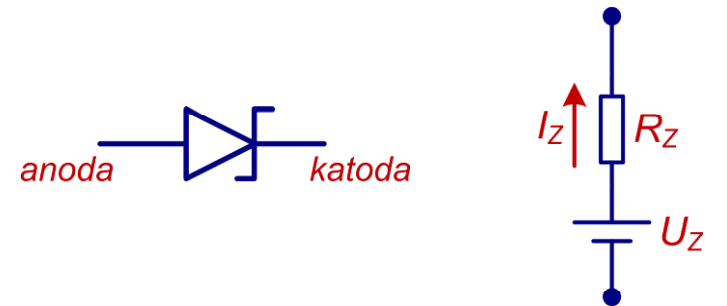
- Spajanje Zenerove diode
- Izlazni napon

$$U_o = U_{UL} \frac{r_z}{R_s + r_z} + U_z \frac{R_s}{R_s + r_z} - I_L \left( \frac{R_s r_z}{R_s + r_z} \right)$$

Naponska  
regulacija

Ovisnost o  
temperaturi

Strujna  
regulacija

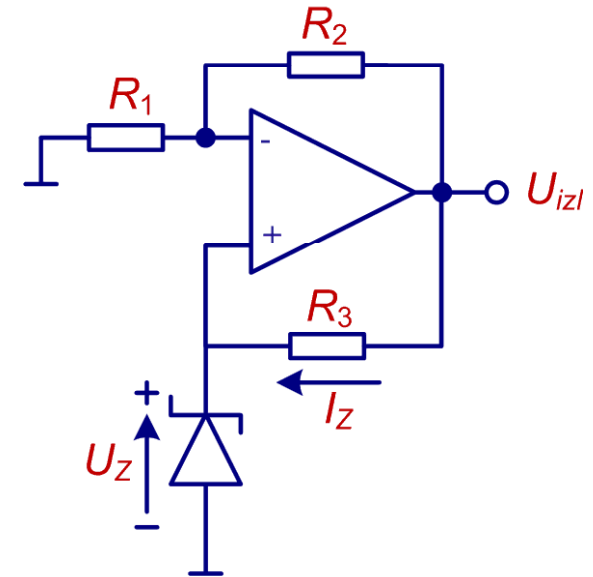


- Za stabilan izlazni napon:

- $r_z \ll$
- $R_s \gg$  (ograničenje  $I_{zmin}$ , snaga)
- $U_{UL} \approx (2-4) U_z$
- $I_{zmin} \approx 1/4 I_{zmax}$

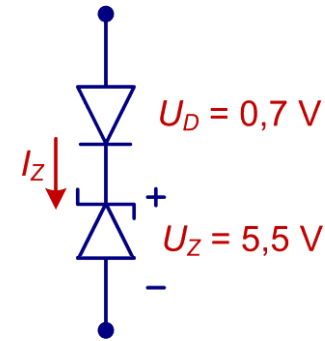
# IRN sa Zener diodom – 6

- Spoj Zenerove diode s operacijskim pojačalom
- **Kompenzacija promjena napona napajanja i tereta**
- Nije temperaturno kompenzirana



# IRN sa Zener diodom – 7

- Temperaturna kompenzacija
- Ideja - poništavanje temperaturnih koeficijenata Zenerove i signalnih dioda
  - Konačni temperaturni koeficijent do 1ppm/°C (5-100)
- Problem – raste radni napon
- Drugi pristupi temperaturnoj kompenzaciji
  - Temperaturna stabilizacija
  - Termostatirano zagrijavanje na visoku temperaturu 90°C





# Temperaturna ovisnost napona pn spoja - 1

➤ Napon  $U_D = U_T \ln\left(\frac{I_D}{I_S}\right)$

➤  $U_T$ , naponski ekvivalent temperature

$$U_T = \frac{kT}{q}$$

- $I_S$ , struja zasićenja
- $k$ , Boltzmannova konstanta
  - $q$ , naboj elektrona
  - $T$ , apsolutna temperatura
  - $B$ , konstanta
  - $U_{GO}=1,205V$ , širina zabranjenog pojasa (*bandgap*) Si

$$I_S = BT^3 \exp\left(-\frac{U_{GO}}{U_T}\right)$$

# Temperaturna ovisnost napona pn spoja - 2

## ➤ Temperaturni koeficijent (TC)

$$TC(U_T) = \frac{k}{q} = 0,0862 \frac{\text{mV}}{^\circ\text{C}}$$

$$TC(U_D) = \frac{\partial U_D}{\partial T} = \frac{\partial U_T}{\partial T} \ln\left(\frac{I_D}{I_S}\right) + U_T \frac{\partial \left[ \ln\left(\frac{I_D}{I_S}\right) \right]}{\partial T}$$

$$TC(U_D) = \frac{U_D}{T} - U_T \frac{\partial \left( 3 \ln T - \frac{U_{GO}}{U_T} \right)}{\partial T} = - \left( \frac{U_{GO} - U_D}{T} + \frac{3k}{q} \right)$$

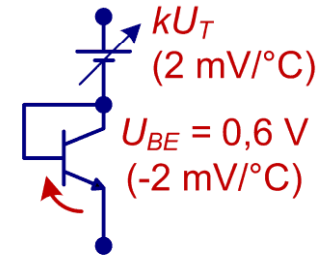
➤  $T=25^\circ\text{C}$ ,  $U_D=650\text{mV}$

➤  $TC(U_D) \approx -2,1\text{mV}/^\circ\text{C}$

➤ Ideje za temperaturnu kompenzaciju

# Temperaturna ovisnost napona pn spoja - 3

- Spojiti napon diode (tranzistora) s negativnim temperaturnim koeficijentom (CTAT *Complementary To Absolute Temperature*) s izvorom koji ima pozitivan temperaturni koeficijent (PTAT *Proportional To Absolute Temperature*)



$$U_{BG} = KU_T + U_{BE}$$

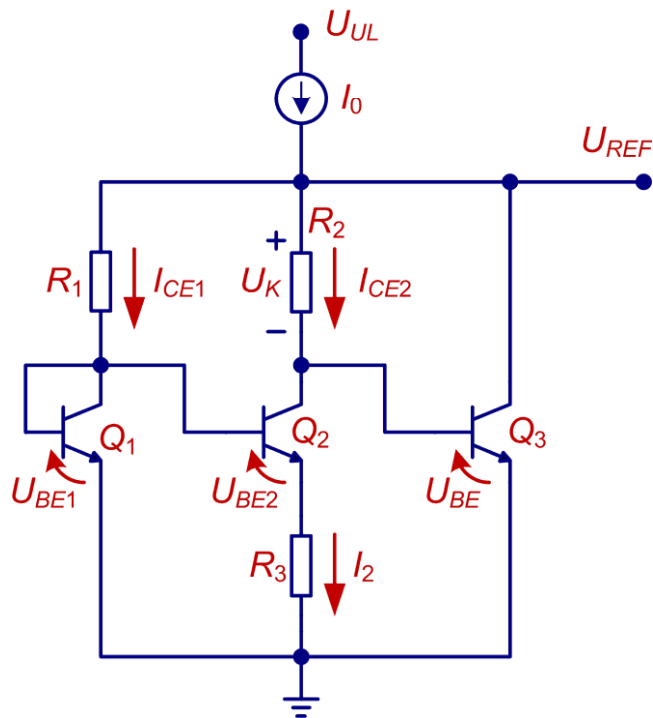
$$TC(U_{BG}) = KTC(U_T) + TC(U_{BE}) = 0$$

$$K = -\frac{TC(U_{BE})}{TC(U_T)} = \frac{U_{GO} - U_{BE}}{U_T} + 3$$

$$U_{BG} = U_{GO} + 3U_T \quad U_{BG}(25^\circ\text{C}) \approx 1,282\text{V}$$

- Napon osnovne strukture i IRN *bandgap* tipa

# IRN *bandgap* tipa



$$I_2 = \frac{U_{BE1} - U_{BE2}}{R_3} = \frac{\Delta U_{BE}}{R_3}$$

$$I_{CE} = I_S \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right)$$

$$U_{BE} = U_T \ln \frac{I_C}{I_S} \rightarrow \Delta U_{BE} = U_T \ln \frac{I_{CE1}}{I_{CE2}}$$

$$I_{S1} = I_{S2}, \beta \gg 1$$

$$I_{CE2} \approx I_2 = \frac{U_T}{R_3} \ln \frac{I_{CE1}}{I_{CE2}}$$

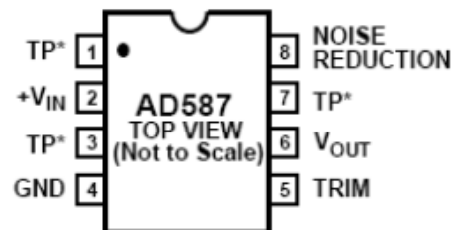
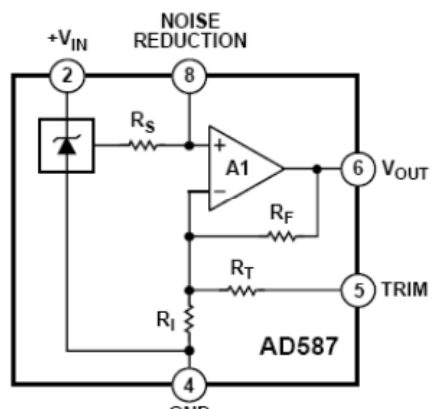
$$U_K = R_2 I_{C2} = U_T \frac{R_2}{R_3} \ln \frac{I_{C1}}{I_{C2}} \approx 23,2 U_T$$

$$U_{REF} = U_{BE} + U_K = 0,6 + 23,2 \times 26 \cdot 10^{-3} = 1,203V$$

# Usporedba Zener / *bandgap*

<b>Zener (<i>buried</i>)</b>	<b><i>Bandgap</i></b>
napajanje >5V (napon 5-7V, napajanje 10V) radna struja 1-10mA	napajanje <5V  radna struja >100μA
nizak šum @ veliku snagu	visok šum @ veliku snagu <ul style="list-style-type: none"> <li>• šum se skalira s naponom IRN</li> <li>• smanjenje NF šuma ⇒ povećati radne struje i povećati tranzistore (veća potrošnja i kućišta)</li> </ul>
dugotrajna stabilnost i temperaturno klizanje - dobro	dugotrajna stabilnost i temperaturno klizanje - prosječno
histereza - prosječna	histereza – prosječna
točnost 0,01-0,1%	točnost 0,05-1%

# Primjer - Zener IRN – AD587



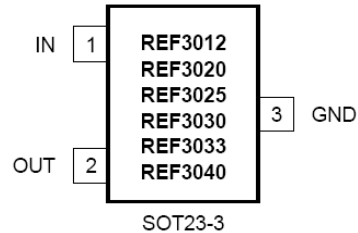
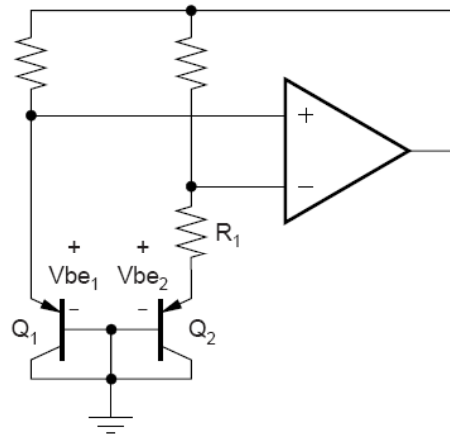
## SPECIFICATIONS

$T_A = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_{IN} = 15\text{ V}$ , unless otherwise noted.

Table 1.

Parameter	AD587J			Unit
	Min	Typ	Max	
OUTPUT VOLTAGE	9.990		10.010	V
OUTPUT VOLTAGE DRIFT <sup>1</sup>				
$0^\circ\text{C}$ to $70^\circ\text{C}$			20	ppm/ $^\circ\text{C}$
$-55^\circ\text{C}$ to $+125^\circ\text{C}$			20	ppm/ $^\circ\text{C}$
GAIN ADJUSTMENT	+3			%
	-1			%
LINE REGULATION <sup>1</sup>				
$13.5\text{ V} \leq +V_{IN} \leq 36\text{ V}$				
$T_{MIN}$ to $T_{MAX}$			$\pm 100$	$\mu\text{V/V}$
LOAD REGULATION <sup>1</sup>				
Sourcing $0\text{ mA} < I_{OUT} < 10\text{ mA}$				
$T_{MIN}$ to $T_{MAX}$			$\pm 100$	$\mu\text{V/mA}$
Sourcing $-10\text{ mA} < I_{OUT} < 0\text{ mA}^2$				
$T_{MIN}$ to $T_{MAX}$			$\pm 100$	$\mu\text{V/mA}$
QUIESCENT CURRENT		2	4	mA
POWER DISSIPATION		30		mW
OUTPUT NOISE				
$0.1\text{ Hz}$ to $10\text{ Hz}$		4		$\mu\text{V p-p}$
Spectral Density, $100\text{ Hz}$		100		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
LONG-TERM STABILITY		$\pm 15$		ppm/1000 hr
SHORT-CIRCUIT CURRENT-TO-GROUND		30	70	mA
SHORT-CIRCUIT CURRENT-TO- $+V_{IN}$		30	70	mA
TEMPERATURE RANGE				
Specified Performance (J, K)	0		70	$^\circ\text{C}$
Operating Performance (J, K) <sup>3</sup>	-40		+85	$^\circ\text{C}$
Specified Performance (U)	-55		+125	$^\circ\text{C}$
Operating Performance (U) <sup>3</sup>	-55		+125	$^\circ\text{C}$

# Primjer - *bandgap* IRN – REF30XX



## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

**Boldface** limits apply over the specified temperature range,  $T_A = -40^\circ\text{C}$  to  $+125^\circ\text{C}$ .

At  $T_A = +25^\circ\text{C}$ ,  $I_{\text{LOAD}} = 0\text{mA}$ ,  $V_{\text{IN}} = 5\text{V}$ , unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	REF30xx			UNITS
		MIN	TYP	MAX	
REF3030 – 3.0V					
OUTPUT VOLTAGE Initial Accuracy	V <sub>OUT</sub>	2.994	3.0	3.006 0.2	V %
NOISE Output Voltage Noise Voltage Noise	f = 0.1Hz to 10Hz f = 10Hz to 10kHz		33 94		μVp-p μVrms
LINE REGULATION	V <sub>REF</sub> + 50mV ≤ V <sub>IN</sub> ≤ 5.5V		120	375	μV/V

<b>REF3012, REF3020, REF3025, REF3030, REF3033, REF3040</b>					
<b>OUTPUT VOLTAGE TEMP DRIFT<sup>(2)</sup></b>	$dV_{\text{OUT}}/dT$	$0^\circ\text{C} \leq T_A \leq +70^\circ\text{C}$ $-30^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$ $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +85^\circ\text{C}$ $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$		20 28 30 35	50 60 65 75  $\text{ppm}/^\circ\text{C}$ $\text{ppm}/^\circ\text{C}$ $\text{ppm}/^\circ\text{C}$ $\text{ppm}/^\circ\text{C}$
<b>LONG-TERM STABILITY</b>		0-1000h 1000-2000h		24 15	ppm ppm
<b>LOAD REGULATION<sup>(3)</sup></b>	$dV_{\text{OUT}}/dI_{\text{LOAD}}$	$0\text{mA} < I_{\text{LOAD}} < 25\text{mA}$ , $V_{\text{IN}} = V_{\text{REF}} + 500\text{mV}^{(1)}$		3	100 $\mu\text{V}/\text{mA}$
<b>THERMAL HYSTERESIS<sup>(4)</sup></b>	$dT$			25	100 ppm
<b>DROPOUT VOLTAGE</b>	$V_{\text{IN}} - V_{\text{OUT}}$			1	50 mV
<b>SHORT-CIRCUIT CURRENT</b>	$I_{\text{SC}}$			45	mA
<b>TURN ON SETTLING TIME</b>		to 0.1% at $V_{\text{IN}} = 5\text{V}$ with $C_1 = 0$		120	$\mu\text{s}$
<b>POWER SUPPLY</b> Voltage	$V_S$	$I_L = 0$ $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$	$V_{\text{REF}} + 0.001^{(5)}$ $V_{\text{REF}} + 0.05$	5.5 5.5	V V
<b>Over Temperature</b> Quiescent Current	$I_Q$	$-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$		42 50	$\mu\text{A}$ $\mu\text{A}$
<b>Over Temperature</b>		$-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$		59	$\mu\text{A}$
<b>TEMPERATURE RANGE</b> Specified Range Operating Range Storage Range Thermal Resistance SOT23-3 Surface-Mount	$\theta_{\text{JC}}$ $\theta_{\text{JA}}$			-40 -40 -65  110 336	+125 +125 +150  $^\circ\text{C}/\text{W}$ $^\circ\text{C}/\text{W}$

# Primjer - *bandgap* IRN – REF30XX

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

**Boldface** limits apply over the specified temperature range,  $T_A = -40^{\circ}\text{C}$  to  $+125^{\circ}\text{C}$ .

At  $T_A = +25^{\circ}\text{C}$ ,  $I_{\text{LOAD}} = 0\text{mA}$ ,  $V_{\text{IN}} = 5\text{V}$ , unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	REF30xx			UNITS
		MIN	TYP	MAX	
REF3012 <sup>(1)</sup> - 1.25V					
OUTPUT VOLTAGE Initial Accuracy	V <sub>OUT</sub>	1.2475	1.25	1.2525 0.2	V %
NOISE Output Voltage Noise Voltage Noise	f = 0.1Hz to 10Hz f = 10Hz to 10kHz		14 42		μVp-p μVrms
LINE REGULATION	1.8V ≤ V <sub>IN</sub> ≤ 5.5V		60	190	μV/V
REF3020 – 2.048					
OUTPUT VOLTAGE Initial Accuracy	V <sub>OUT</sub>	2.044	2.048	2.052 0.2	V %
NOISE Output Voltage Noise Voltage Noise	f = 0.1Hz to 10Hz f = 10Hz to 10kHz		23 65		μVp-p μVrms
LINE REGULATION	V <sub>REF</sub> + 50mV ≤ V <sub>IN</sub> ≤ 5.5V		110	290	μV/V
REF3025 – 2.5V					
OUTPUT VOLTAGE Initial Accuracy	V <sub>OUT</sub>	2.495	2.50	2.505 0.2	V %
NOISE Output Voltage Noise Voltage Noise	f = 0.1Hz to 10Hz f = 10Hz to 10kHz		28 80		μVp-p μVrms
LINE REGULATION	V <sub>REF</sub> + 50mV ≤ V <sub>IN</sub> ≤ 5.5V		120	325	μV/V