



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet elektrotehnike i računarstva  
Zavod za osnove elektrotehnike i električka mjeren



## 6. TEMA

# DIGITALNI MJERNI INSTRUMENTI – MULTIMETRI I OSCIOSKOPI

Predmet “Mjerenja u elektrotehnici”  
Prof.dr.sc. Damir Ilić  
Zagreb, 2020.

# Teme cjeline

---

- ❑ **Digitalni multimetri – blok dijagram**
  - ❑ **Digitalni multimetri – mjerenje struje**
  - ❑ **Digitalni multimetri – mjerenje otpora**
  - ❑ **A/D pretvornici**
  - ❑ **Rad s digitalnim multimetrima**
  - ❑ **Digitalni osciloskopi – blok dijagram**
  - ❑ **Rad s digitalnim osciloskopima**
  - ❑ **Univerzalni brojači**
- 
- ❑ Napomena: oznake proizvođača navedene su ponekad u tekstu radi točnog informiranja i ni u kojem slučaju ne podrazumijevaju stav autora da su to najbolji ili preporučeni instrumenti

# Osnovni pojmovi

- **Mjerilo (*measuring instrument*)** - sprava kojom se mjeri, sama ili zajedno s ostalom opremom
- **Razlučivanje pokaznika (*resolution of a displaying device*)** - najmanja razlika pokazivanja pokaznika koja se može smisleno razlikovati
- **Referentni radni uvjeti (*reference operating conditions*)** - uvjeti uporabe propisani za ispitivanje značajki mjerila ili mjernog sustava, ili za usporedbe mjernih rezultata
- **Umjeravanje (*calibration*)** – djelovanje koje, pod definiranim uvjetima, u prvom koraku uspostavlja odnos između vrijednosti veličine s mjernom nesigurnošću određenu mjernim etalom i pripadnog očitavanja s pridruženom mjernom nesigurnošću, te u drugom koraku, koristi te informacije za uspostavljanje odnosa za dobivanje mjernog rezultata iz očitavanja  
umjeravanje  $\neq$  ugađanje (*adjustment*)
- ...
- **Za sve ostale pojmove treba pogledati VIM**

# Digitalni multimetri

---

## □ Prikaz

- broj znamenaka (*digit*) koje može prikazati iskazuje se sa  $X\frac{1}{2}$  znamenaka, gdje  $\frac{1}{2}$  predstavlja parcijalnu znamenku (može biti i  $\frac{3}{4}$ ) – **ne postoji normirani (obavezni) način označavanja!**
- to znači npr. da instrument označen kao "3 $\frac{1}{2}$  digit DMM" na mjernom opsegu od 300 mV može prikazati od 000,0 mV do 299,9 mV jer na najznačajnijem mjestu ne može prikazati znamenke od "0" do "9" nego samo "0", "1" ili "2" – ovo vrijedi načelno jer poneki DMM-i dopuštaju prekoračenje mjernog opseg do npr. 10 %
- ponekad se označavaju i kao npr. "3 $\frac{1}{2}$ -resolution" – pritom pojam razlučivanje (resolution) ne treba miješati s najmanjom razlikom pokazivanja

## □ Binarni sustav brojanja

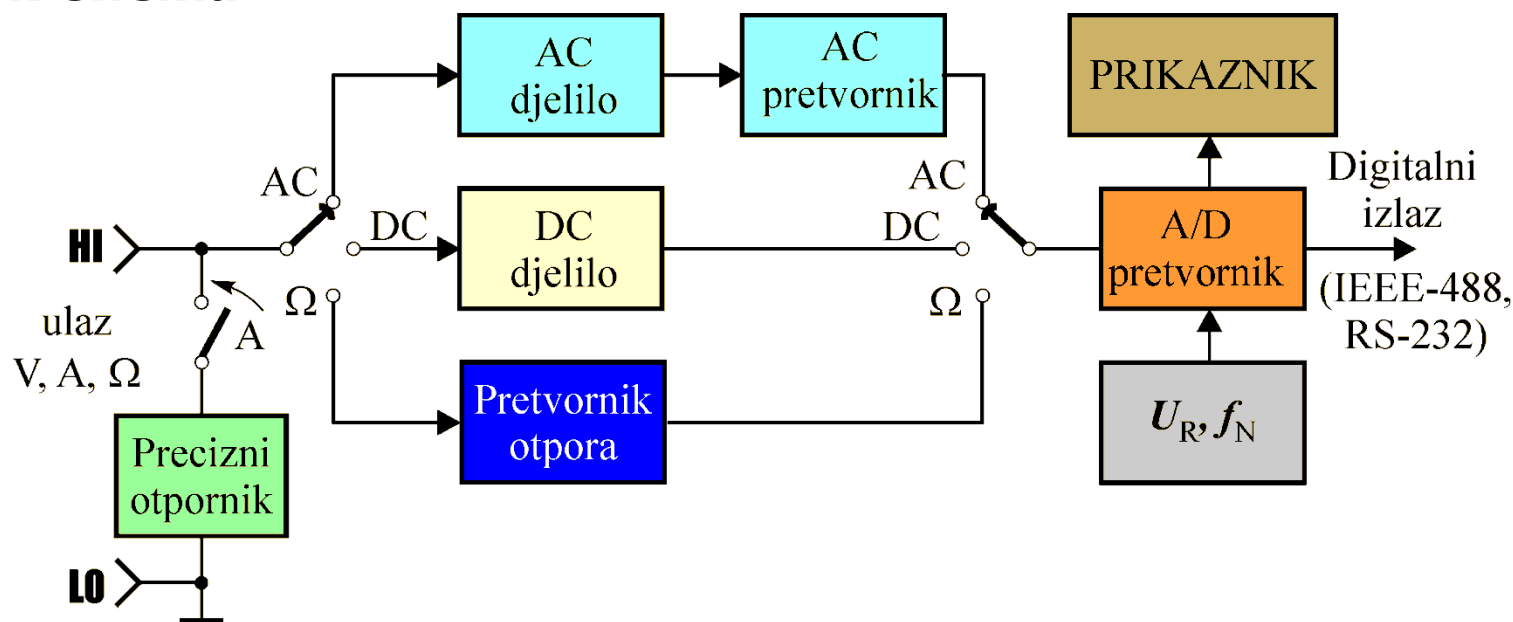
- koristi se zbog izvedbenih razloga jer su u binarnom sustavu potrebne samo dvije znamenke, koje se jednostavno ostvaruju s pomoću elemenata koji mogu zauzeti dva stanja (npr. tranzistor, sklopka i dr.)
- mjerni se rezultat prije prikazivanja na instrumentu pretvara u dekadski broj koji je prikladniji za očitavanje

# Digitalni multimetri - blok dijagram

## □ Osnovni dijelovi digitalnog multimetra

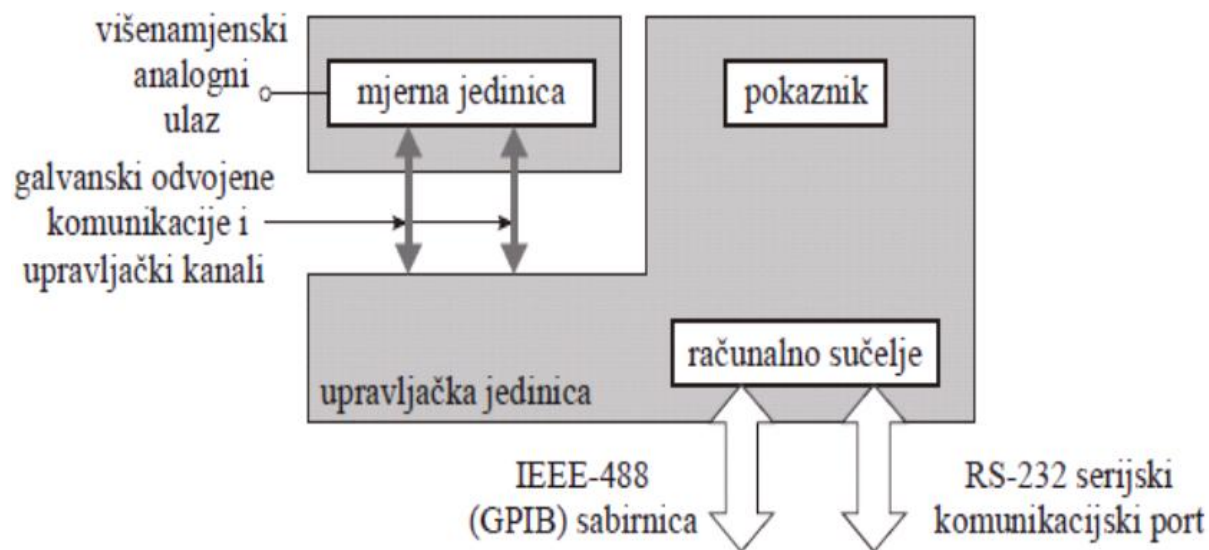
- ulazno djelilo i/ili pretpojačalo
- A/D pretvornik
- logički sklopovi i komparatori
- izvor referentnog napona ( $U_R$ ) i referentni oscilator ( $f_N$ )
- prikaznik

## □ Blok-shema



# Digitalni multimetri - mjerna jedinica

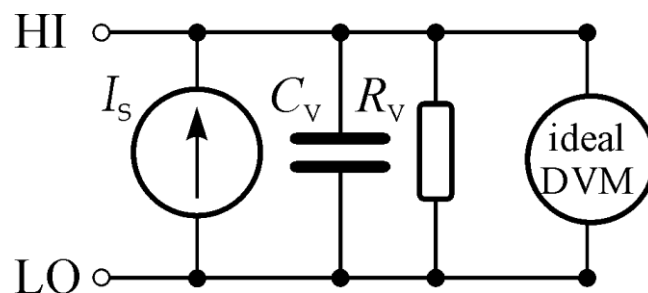
- Galvansko odvajanje mjernog i upravljačkog dijela (kod složenijih i boljih DMM-a)



# Digitalni multimetri

## □ Ulazni dio digitalnog instrumenta

- mjerenje napona: visokoomska naponska djelila (točnost i vremenska stabilnost omjera)
- izmjenična naponska djelila (frekv. neovisna - kompenzirana)
- ekvivalentna ulazna impedancija digitalnog voltmetra (koja iznosi od 10 M $\Omega$  do >10 G $\Omega$ )
  - ulazni otpor
  - ulazni kapacitet
  - ulazna struja namještanja



# Determination of High-Resolution Digital Voltmeter Input Parameters

Ivan Leniček, Damir Ilić, and Roman Malarić

**Abstract**—High-resolution digital voltmeters (DVMs) can be widely used when precise measurements are needed, but input circuitry can contribute to the results of measurement. Therefore, to make uncertainty of measurement as small as possible for a particular measurement, it is necessary to characterize its input parameters. In this paper, the methods for the determination of input resistance, input capacitance, and input offset current of widely used precise DVMs HP 3458A with 8 1/2-digit resolution are presented. The method with voltage source and high-ohmic divider resistor has been developed for the determination of both input offset current  $I_S$  and input resistance  $R_V$ . The second method with the source of the linear voltage ramp and the picoamperimeter is primarily used for the determination of input capacitance  $C_V$ . It was shown that the input offset current of voltmeters is in the range of picoamperes with relative instability of approximately  $\pm 0.1$ , the input resistance is in the range of teraohms with the same relative instability of  $\pm 0.1$ , and the input capacitance was measured to be in the range of a few hundred picofarads with uncertainty of a few picofarads.

**Index Terms**—Digital voltmeter (DVM), input capacitance, input offset current, input resistance.

## I. INTRODUCTION

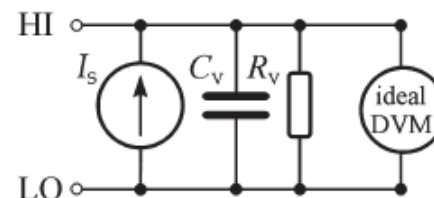


Fig. 1. Voltmeter input circuit parameters.

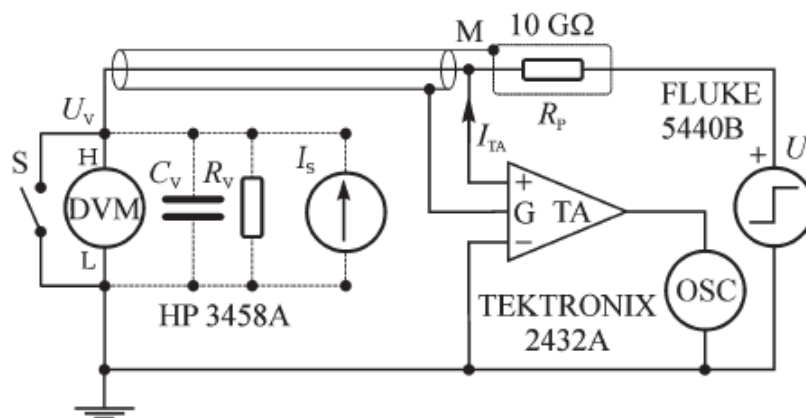


Fig. 2. Measurement circuit for the determination of the DVM's input parameters.

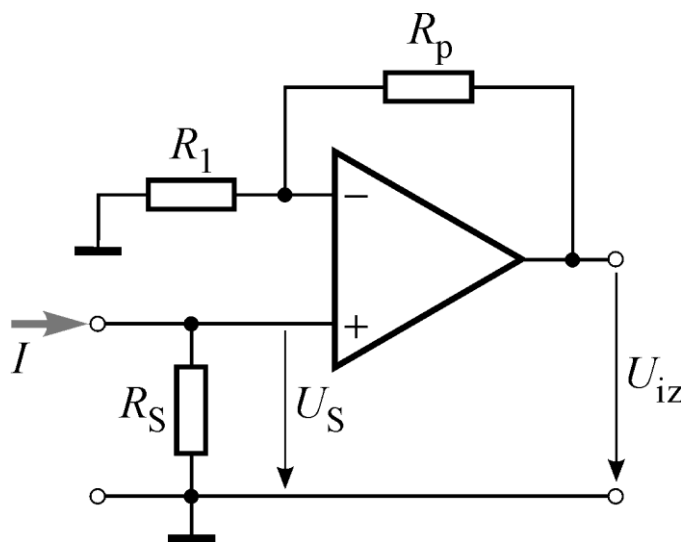


# Digitalni multimetri

## □ Mjerenje struje: pretvornik struje u napon (precizni shunt)

$R_S$

- različiti mjerni opsezi postižu se izborom  $R_S$ , kojeg treba poznavati jer o njegovoj vrijednosti ovisi točnost mjerenja
- poželjno je da  $R_S$  bude što manji, jer manji otpor znači manju vremensku konstantu i brže mjerenje
- uočiti: digitalni ampermetar unosi otpor  $R_S$  u strujni krug te se stvara pad napona (*burden voltage*)



$$U_S = I R_S$$

$$U_{iz} = U_S \left( 1 + \frac{R_p}{R_1} \right)$$

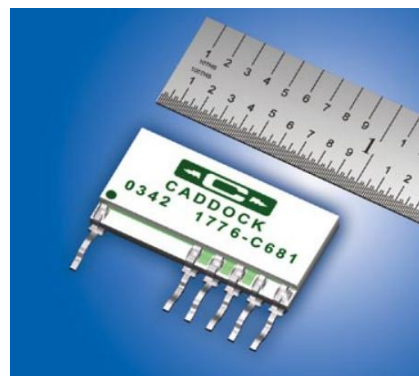
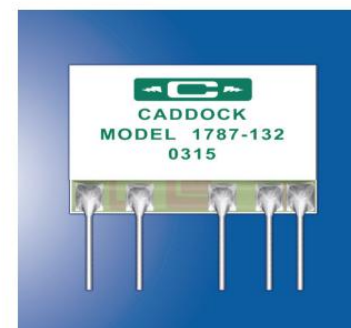
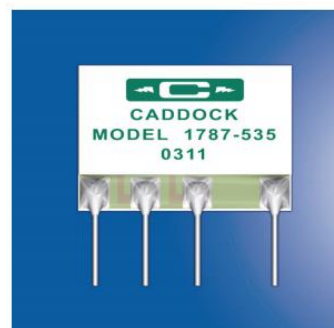
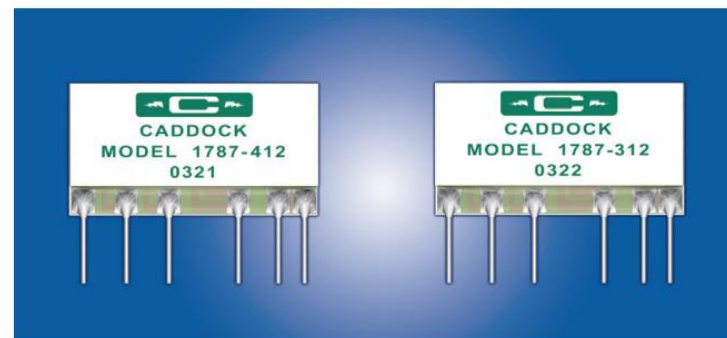
$$U_{iz} = I R_S \left( 1 + \frac{R_p}{R_1} \right)$$

# DMM strujni shunt i djelilo

- R212 1 ohm – +8.3 ppm/K Datalog
- R211 9 ohm – +4.7 ppm/K Datalog
- R207 40K “reference” VHP101 – +1.4 ppm/K Datalog



## □ Caddock djelilo



# Digitalni multimetri

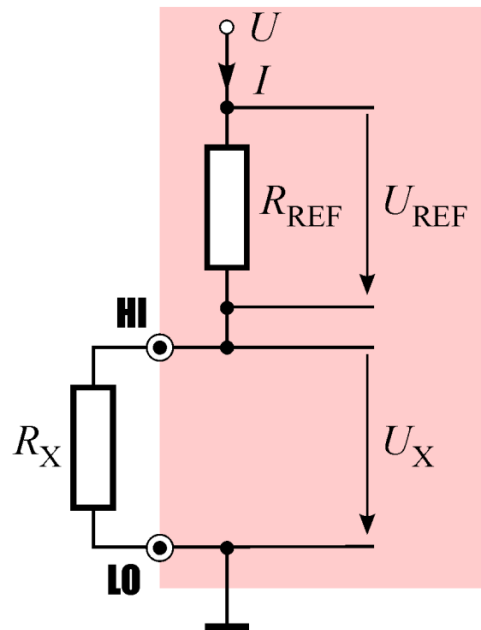
## □ **Mjerenje otpora:** pretvornik otpora u napon (poredbeni precizni otpornik $R_{REF}$ )

- uočiti: kroz mjereni otpor prolazi struja koja može prouzročiti njegovo neželjeno zagrijavanje

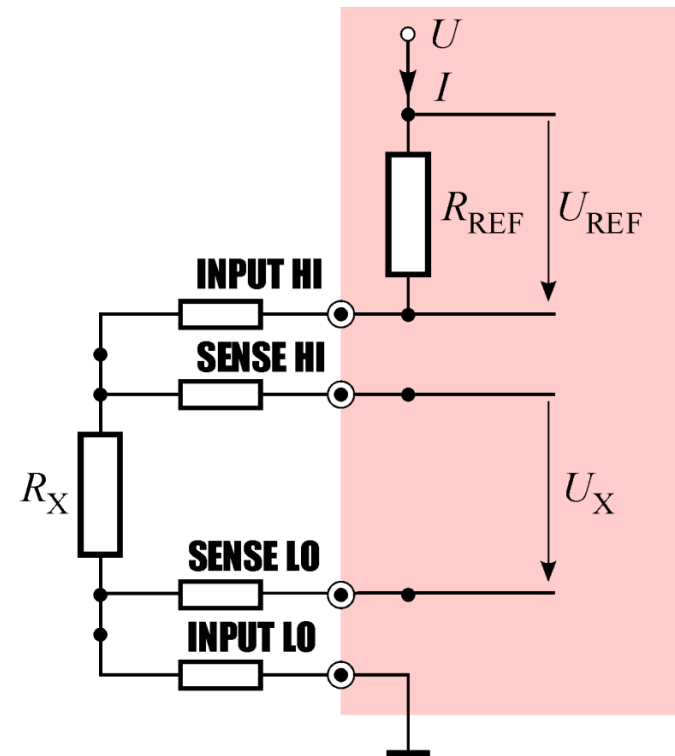
$$U_{REF} = I R_{REF}$$

$$U_X = I R_X$$

$$R_X = \frac{U_X}{I} = R_{REF} \frac{U_X}{U_{REF}}$$



**mjerenje velikih otpora**

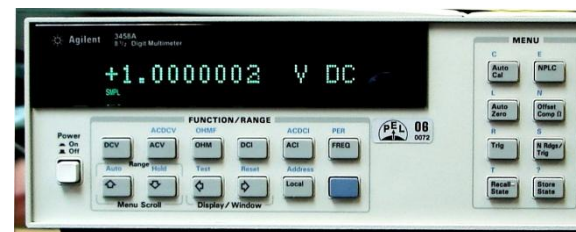


**4-žično mjerenje malih otpora**

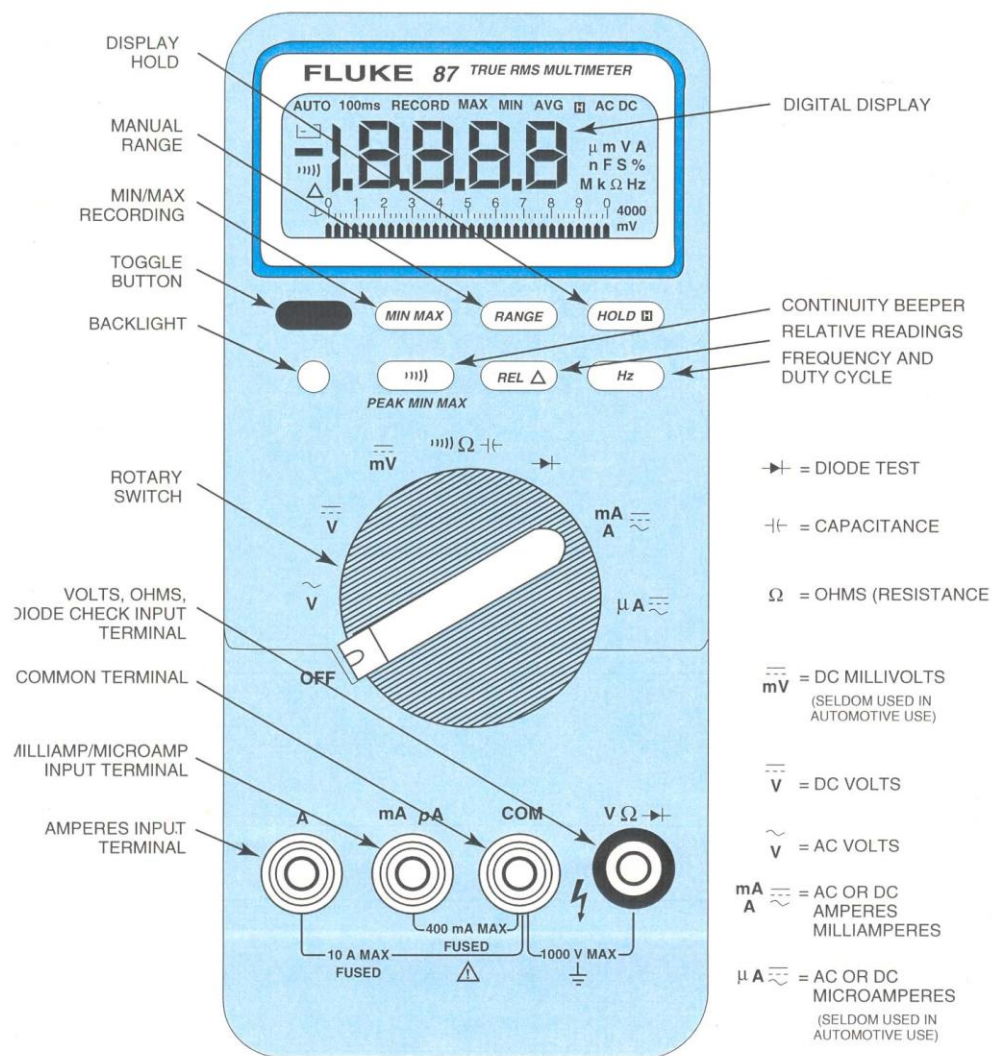
# Digitalni multimetri - primjer vrhunskog

## □ Prikaznik instrumenta

- primjer: Keysight 3458A s maksimalnim prikazom  $8\frac{1}{2}$  znamenaka (na opsegu 10 V) te sa  $7\frac{1}{2}$  (na opsegu 1 V)
- uočiti 6 ulaznih priključnica: Input HI, Input LO, Sense HI, Sense LO, GRD (guard), I (HI)



# Digitalni multimeter - primjeri jednostavnijeg



# Digitalni multimetri - značajke

---

## □ Točnost

- ne postoje normirani opsezi ili granice pogrešaka niti razredi točnosti pa se za svaki instrument posebno moraju pročitati upute proizvođača
- obično se iskazuje za vremenski interval od posljednjeg umjeravanja (24 h, 30 dana, 1 godina) zasebno za svako mjerno područje (napon, struja, otpor) i za svaki mjerni opseg

## □ Upute za rukovanje (*instruction manual*)

- uporaba instrumenta bez njihova proučavanja može dovesti do pogrešaka pri mjerenju
- uključuju niz podataka: ulazna impedancija, broj očitavanja u sekundi, prekoračenje mjernog opsega, potiskivanje šuma, matematičke funkcije i druge (ovisno o mogućnostima)

# Mjerenje izmjeničnog napona

---

## □ Termička konverzija

- Toplina generirana na otpornom elementu proporcionalna je kvadratu RMS vrijednosti primjenjenog napona, koristi se termopar za mjerenje te topline
- Mala brzina očitavanja, loš pri niskim frekvencijama

## □ Analogno računanje

- Koriste se log i antilog spojevi za primjenu analognog računanja kvadrata i drugog korijena kod RMS mjerenja
- Velika brzina rada, loš pri visokim frekvencijama

## □ Uzorkovanje (otipkavanje)

- Frekvencija uzimanja uzoraka mora biti jednaka ili viša od dvostruke vrijednosti frekvencije najvišeg harmonika u spektru signala
- Izvrsna linearnost, visoka točnost
- Prikladno za sve valne oblike



# A/D pretvornici

---

- ❑ Digitalni multimetri pretvaraju analognu veličinu u digitalnu i zatim ju prikazuju na numeričkom prikazniku
- ❑ Tu funkciju obavljaju analogno-digitalni pretvornici (A/D pretvornici, ADC, *analog-to-digital converters*), koji su najvažniji dio digitalnog mjernog instrumenta
- ❑ Pritom je najpogodnija analogna veličina za pretvorbu istosmjerni napon, pa se **sve ostale veličine prije pretvorbe u digitalni oblik najprije pretvaraju u istosmjerni napon**
- ❑ Primjer: AD1376KD 12 bita, A/D pretvornik s postupnim približavanjem (*successive approximation*)





# Vrste ADC-a

---

- ❑ **Paralelni A/D pretvornik**
- ❑ **A/D pretvornik s dvostrukim pilastim naponom**
- ❑ **A/D pretvornik s postupnim približavanjem**
- ❑ **A/D pretvornik napona u frekvenciju**
- ❑ **Sigma-delta A/D pretvornik**
- ❑ **...**

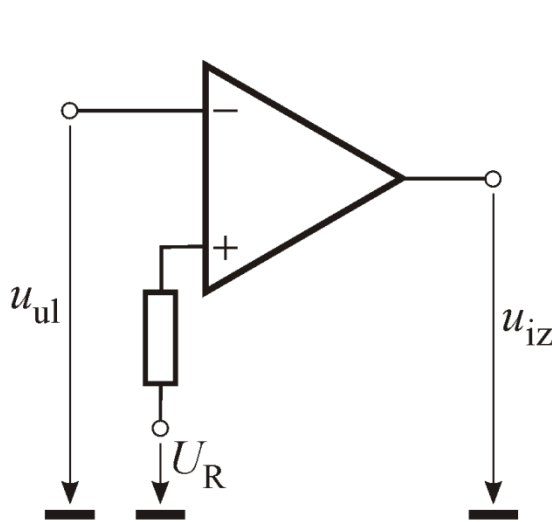
# Komparatori

---

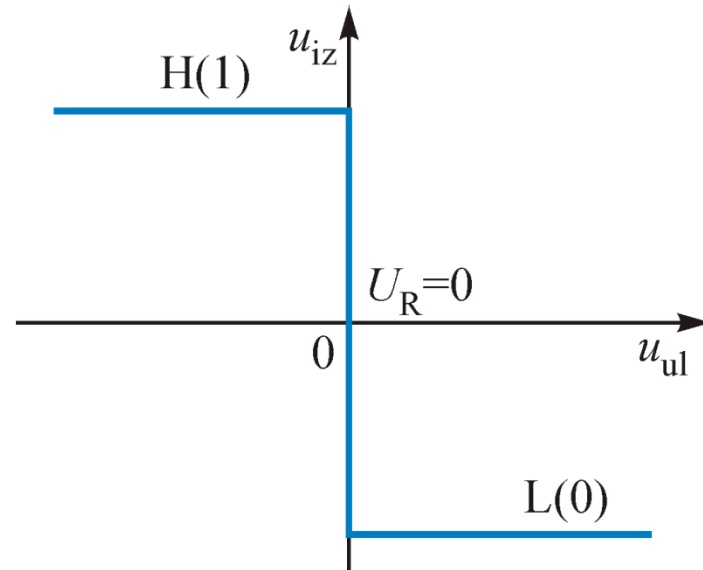
- Naponski komparatori su sklopovi kojima se označuje trenutak u kojemu je neki proizvoljni napon  $u_{ul}$  dosegao razinu referentnog napona  $U_R$
- Kao komparatori koriste se operacijska pojačala u tzv. nelinearnom načinu rada, kada se nalaze u jednom od stabilnih stanja (minimalnom ili maksimalnom naponu)
- Operacijsko pojačalo koristi se bez povratne veze
- Koriste se i u analogno-digitalnim pretvornicima

# Komparatori

## ▣ Idealni komparator



načelna shema



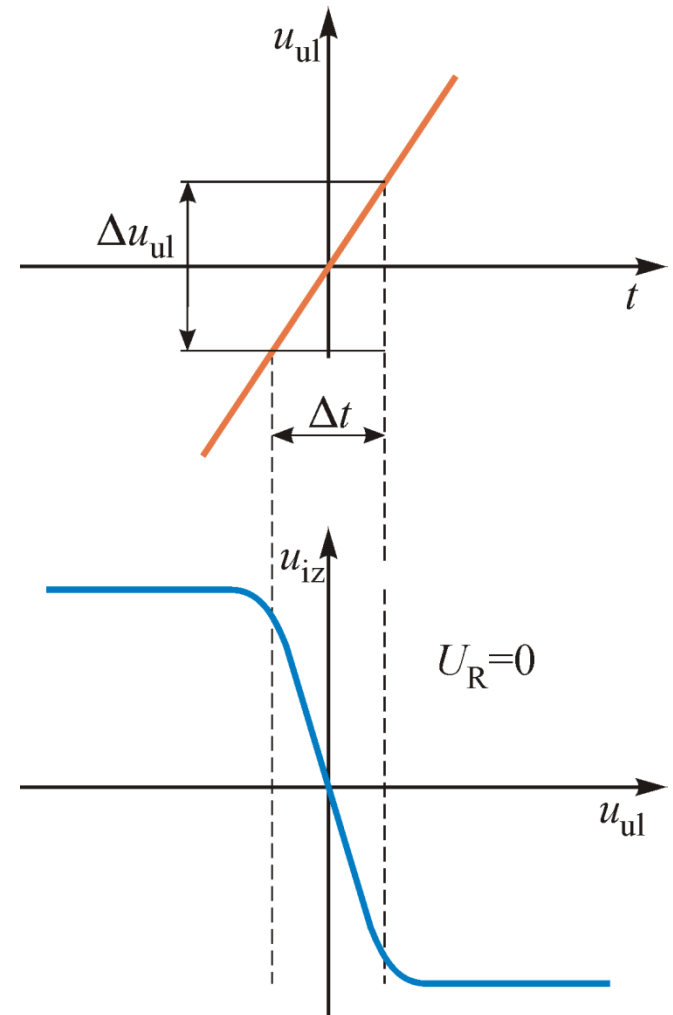
prijenosna karakteristika

- Izlaz će biti na visokoj razini (H, *high*) ako je napon na invertirajućem ulazu manji od onoga na neinvertirajućem, a na niskoj razini (L, *low*) ako je veći
- Logička 0 je ovdje pridružena stanju L, a logička 1 stanju H
- Referentni napon  $U_R=0$  u primjeru, no može biti i različit od ničice

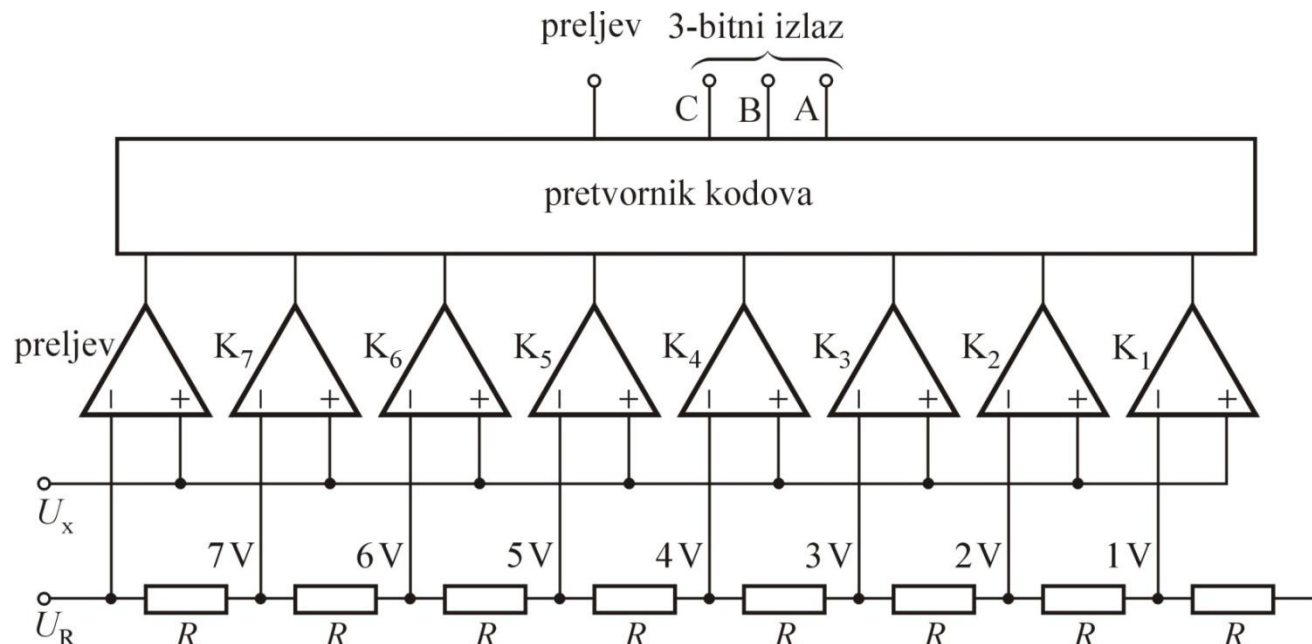
# Komparatori

## □ Realni komparator

Prijelaz iz jednog u drugo stanje traje određeno vrijeme (npr. nekoliko desetaka nanosekundi), a uz veliki  $A_0$  dovoljne su razlike napona  $\Delta u_{ul} < 1 \text{ mV}$



# Paralelni A/D pretvornik



- Pretvornik sa  $n$  bita ima  $2^n - 1$  komparatora (+1 za registraciju preljeva (*overflow*))
- Ostvaruje se velika brzina prijenosa, reda veličine nanosekunde
- Prikazana je načelna shema 3-bitnog pretvornika: referentni napon  $U_R = 8$  V podijeljen je pomoću preciznog otpornog djelila u 7 razina, od 1 V do 7 V
- Komparatori na kojima je  $U_x > U_R$  imat će izlaz "high", a ostali izlaz "low"
- Primjer: za  $U_x = 4,5$  V izlazi komparatora  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  i  $K_4$  bit će "high", a ostali "low"

**NAJBRŽI TIP PRETVORNIKA – KORISTI SE ISKLJUČIVO U DIGITALNIM OSCIOSKOPIMA**

# Paralelni A/D pretvornik - prednosti i nedostaci

---

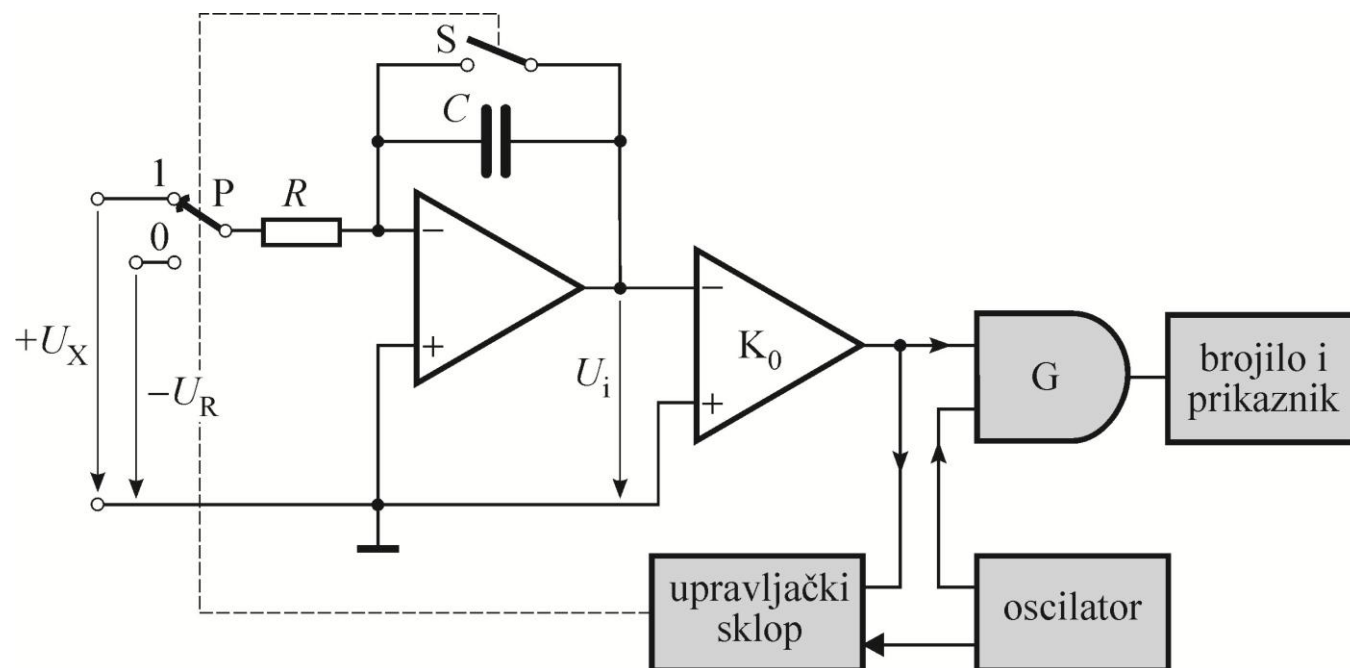
## □ Prednosti:

- Vrlo brz (4 ns do 1000 ns), koristan kod aplikacija gdje je potrebna brzina (spektralni analizatori)

## □ Nedostaci:

- Slabo razlučivanje (4 bita do 10 bita)
- Visoka cijena (\$150 za 6 bitni, \$3000 za 10 bitni)

# A/D pretvornik s dvostrukim pilastim naponom

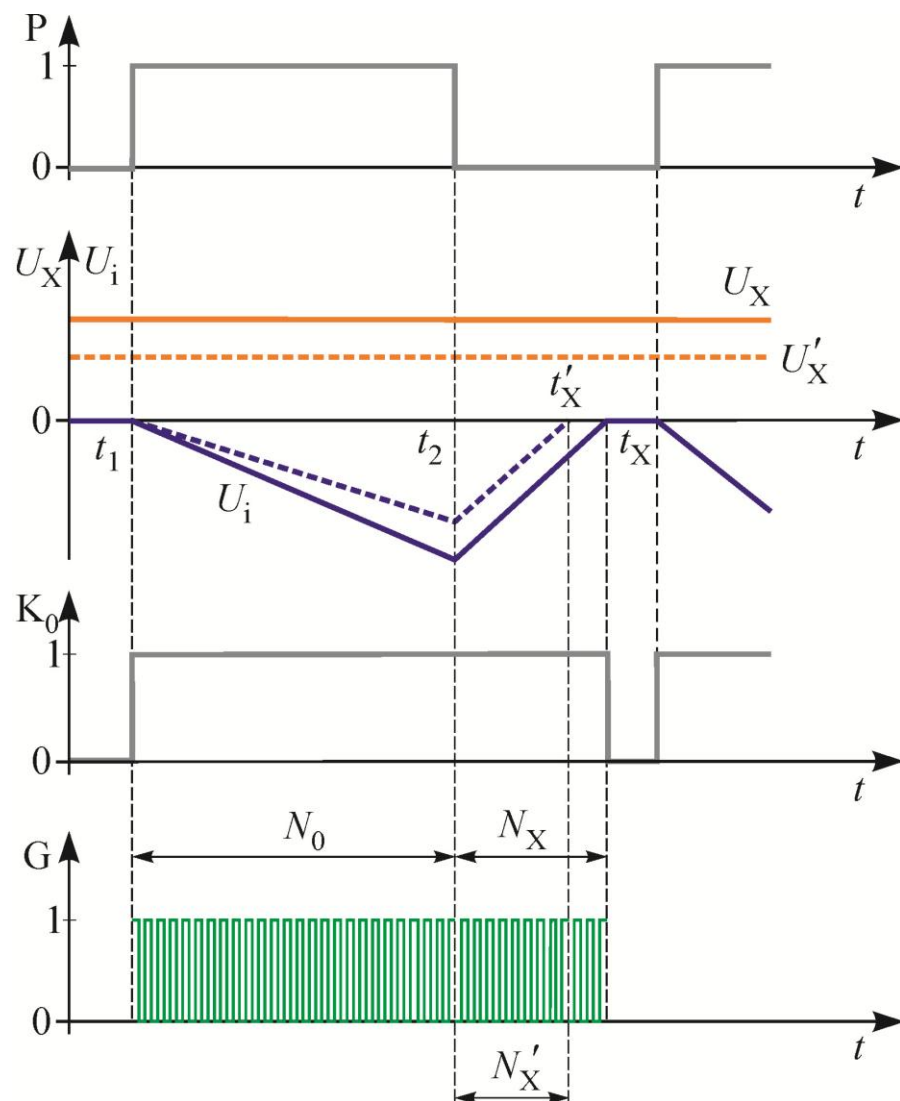


a)  $t_1 \leq t \leq t_2$  **integriranje** mjenenog napona  $U_X$  određeno vrijeme  $\Delta t_0$  (npr. 100 ms):

$$\Delta t_0 = t_2 - t_1$$

$$U_i(t_2) = -\frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} U_X dt = -\frac{1}{RC} \bar{U}_X \Delta t_0$$

# A/D pretvornik s dvostrukim pilastim naponom



b)  $t_2 < t < t_X$  integriranje referentnog napona  $-U_R$  tijekom intervala  $\Delta t_X$

$$\Delta t_X = t_X - t_2$$

$$U_i(t_X) = U_i(t_2) - \frac{1}{RC} \int_{t_2}^{t_X} -U_R dt$$



# A/D pretvornik s dvostrukim pilastim naponom

c) za  $t = t_X$  vrijedi da je  $U_i(t_X) = 0$  pa slijedi:

$$-\frac{1}{RC} \bar{U}_X \Delta t_0 = -\frac{1}{RC} U_R \Delta t_X$$

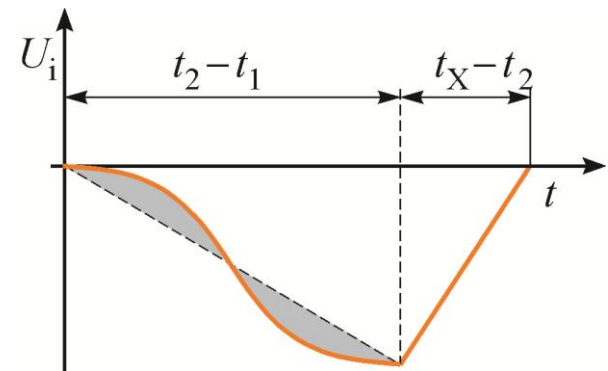
$$\Delta t_0 = \frac{N_0}{f}$$

$$\Delta t_X = \frac{N_X}{f}$$

$$\bar{U}_X = U_R \frac{N_X}{N_0}$$

Dobro potiskivanje smetnji mrežne frekvencije postiže se izborom vremena integracije  $\Delta t_0$  višekratnikom periode mrežnog napona (50 Hz) – taj se parametar naziva NPLC (Number of Power Line Cycles)

Karakteristike: odziv na srednju vrijednost napona, visoka točnost i razlučivanje te relativno skromna brzina.



# A/D pretvornik s dvostrukim pilastim naponom - prednosti i nedostaci

---

## □ **Prednosti:**

- Veliko razlučivanje (10 bita do 24 bita)
- Vrlo visoka točnost (0,01 % ili bolje)
- Vrlo otporan na šum
- Niska cijena
- Vrlo visoka stalnost (vremenska i temperaturna)

## □ **Nedostaci:**

- Dugo vrijeme konverzije (1 s do 10 s)

# HP 3458A

## An 8½-Digit Digital Multimeter Capable of 100,000 Readings per Second and Two-Source Calibration

A highly linear and extremely flexible analog-to-digital converter and a state-of-the-art design give this DMM new performance and measurement capabilities for automated test, calibration laboratory, or R&D applications.

by Scott D. Stever

THE DIGITAL MULTIMETER OR DMM is among the most common and most versatile instruments available for low-frequency and dc measurements in automated test, calibration laboratory, and bench R&D applications. The use of general-purpose instrumentation in automated measurement systems has steadily grown over the past decade. While early users of programmable instruments were elated to be able to automate costly, tedious, error-prone measurements or characterization processes, the sophistication and needs of today's users are orders of magnitude greater. The computing power of instrument controllers has increased manifold since the mid-1970s and so have user expectations for the performance of measurement systems. Test efficiency in many applications is no longer limited by the device under test or the instrument controller's horsepower. Often either the configuration speed or the measurement speed of the test instrumentation has become the limiting factor for achieving greater test throughput. In many systems, the DMM is required to perform hundreds of measurements and be capable of multiple functions with various resolutions and accuracies.

In some applications, several DMMs may be required to characterize a single device. For example, measurements requiring high precision may need a slower DMM with calibration laboratory performance. Usually, the majority of measurements can be satisfied by the faster, moderate-resolution capabilities of a traditional system DMM. In extreme cases, where speed or sample timing are critical to the application, a lower-resolution high-speed DMM may be required. A single digital multimeter capable of fulfilling this broad range of measurement capabilities can reduce system complexity and development costs. If it also provides shorter reconfiguration time and increased measurement speed, test throughput can also be improved for automated test applications.

The HP 3458A Digital Multimeter (Fig. 1) was developed to address the increasing requirements for flexible, accurate, and cost-effective solutions in today's automated test applications. The product concept centers upon the synergistic application of state-of-the-art technologies to meet these needs. While it is tuned for high throughput in computer-aided testing, the HP 3458A also offers calibration laboratory accuracy in dc volts, ac volts, and resistance. Owners can trade speed for resolution, from 100,000 measurements per second with 4½-digit (16-bit) resolution to six measurements per second with 8½-digit resolution. At 5½-digit resolution, the DMM achieves 50,000 readings per second. To maximize the measurement speed for the resolution selected, the integration time is selectable from 500 nanoseconds to one second in 100-ns steps. The effect is an almost continuous range of speed-versus-resolution trade-offs.

The HP 3458A Digital Multimeter (Fig. 1) was developed to address the increasing requirements for flexible, accurate, and cost-effective solutions in today's automated test applications. The product concept centers upon the synergistic application of state-of-the-art technologies to meet these needs. While it is tuned for high throughput in computer-aided testing, the HP 3458A also offers calibration laboratory accuracy in dc volts, ac volts, and resistance. Owners can trade speed for resolution, from 100,000 measurements per second with 4½-digit (16-bit) resolution to six measurements per second with 8½-digit resolution. At 5½-digit resolution, the DMM achieves 50,000 readings per second. To maximize the measurement speed for the resolution selected, the integration time is selectable from 500 nanoseconds to one second in 100-ns steps. The effect is an almost continuous range of speed-versus-resolution trade-offs.



Fig. 1. The HP 3458A Digital Multimeter can make 100,000 4½-digit readings per second for high-speed automated test applications. For calibration laboratory applications, it can make six 8½-digit readings per second. Fine control of the integration aperture allows a nearly continuous range of speed-versus-resolution trade-offs.

## An 8½-Digit Integrating Analog-to-Digital Converter with 16-Bit, 100,000-Sample-per-Second Performance

This integrating-type ADC uses multislope runup, multislope rundown, and a two-input structure to achieve the required speed, resolution, and linearity.

by Wayne C. Goeke

THE ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER (ADC) design for the HP 3458A Digital Multimeter was driven by the state-of-the-art requirements for the system design. For example, autocalibration required an ADC with 8½-digit (28-bit) resolution and 7½-digit (25-bit) integral linearity, and the digital ac technique (see article, page 22) required an ADC capable of making 50,000 readings per second with 18-bit resolution.

Integrating ADCs have always been known for their ability to make high-resolution measurements, but tend to be relatively slow. When the HP 3458A's design was started, the fastest integrating ADC known was in the HP 3456A DMM. This ADC uses a technique known as multislope and is capable of making 330 readings per second. The HP 3458A's ADC uses an enhanced implementation of the same multislope technique to achieve a range of speeds and resolutions never before achieved—from 16-bit resolution at 100,000 readings per second to 28-bit resolution at six readings per second. In addition to high resolution, the ADC has high integral linearity—deviations are less than 0.1 ppm (parts per million) of input.

Multislope is a versatile ADC technique, allowing speed to be traded off for resolution within a single circuit. It is easier to understand multislope by first understanding its predecessor, dual-slope.

### Basic Dual-Slope Theory

Dual-slope is a simple integrating-type ADC algorithm. Fig. 1 shows a simple circuit for implementing a dual-slope ADC.

The algorithm starts with the integrator at zero volts. (This is achieved by shorting the integrator capacitor, C.) At time 0 the unknown input voltage  $V_{in}$  is applied to the resistor R by closing switch SW1 for a fixed length of time  $t_u$ . This portion of the algorithm, in which the unknown input is being integrated, is known as runup. At the end of runup (i.e., when SW1 is opened), the output of the integrator,  $V_o$ , can be shown to be

$$V_o(t_u) = -(1/RC) \int_0^{t_u} V_{in}(t) dt$$

or, when  $V_{in}$  is time invariant,

$$V_o(t_u) = -(1/RC) V_{in} t_u.$$

Next a known reference voltage  $V_{ref}$  with polarity opposite to that of  $V_{in}$  is connected to the same resistor R by closing SW2. A counter is started at this time and is stopped when the output of the integrator crosses through zero volts. This portion of the algorithm is known as rundown. The counter contents can be shown to be proportional to the unknown input.

$$V_o(t_2) = V_o(t_u) - (1/RC) V_{ref} t_d = 0,$$

where  $t_d$  is the time required to complete rundown (i.e.,  $t_d = t_2 - t_u$ ). Solving for  $V_{in}$ ,

$$V_{in} = -V_{ref}(t_d/t_u).$$

Letting  $N_u$  be the number of clock periods ( $T_{ck}$ ) during

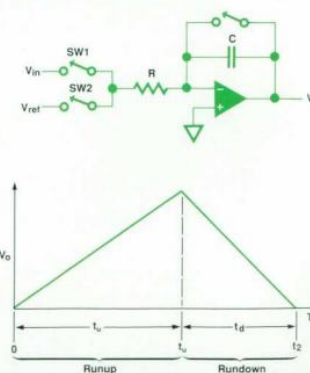
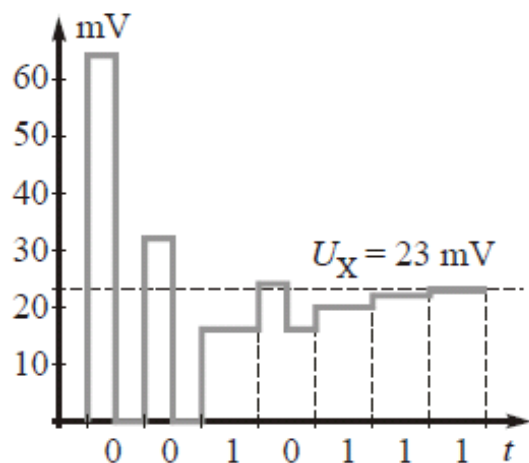
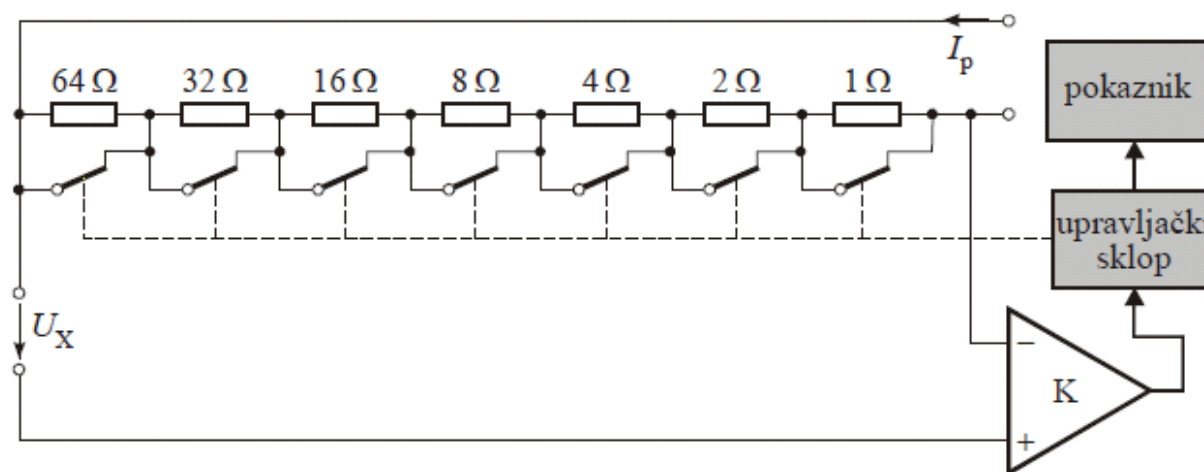


Fig. 1. Dual-slope integrating ADC (analog-to-digital converter) circuit and a typical waveform.

# A/D pretvornik s postupnim približavanjem



Nazivaju se još **stupnjeviti pretvornici** ili **pretvornici sa sukcesivnom aproksimacijom**.

Sastoje se od grupe preciznih otpornika, osjetljivog nulindikатора i upravljačkog uređaja koji redom uključuje i isključuje otpornike sve dok se ne postigne ravnoteža.

Rezultat se iščitava iz položaja preklopki nakon uravnotežavanja. Načelna shema pretvornika je prikazana na gornjoj slici, a načelo uravnotežavanja na lijevoj slici.

# A/D pretvornik s postupnim približavanjem

---

## □ Primjer ugađanja:

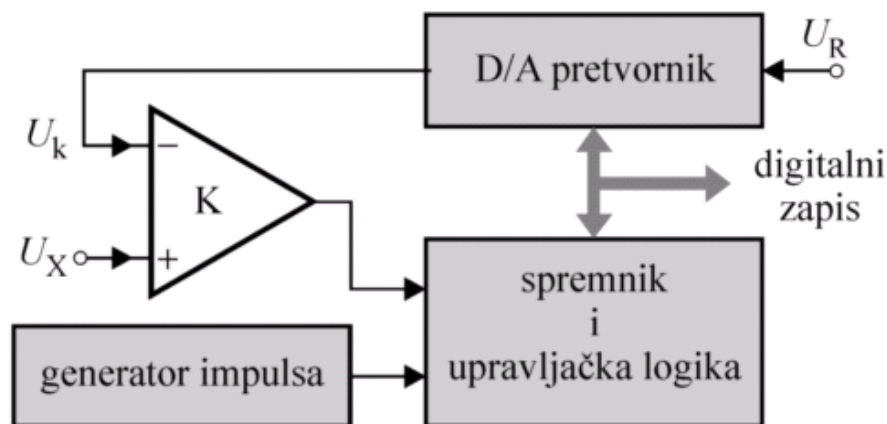
- Pretpostavimo da želimo izmjeriti napon  $U_x = 23 \text{ mV}$ , da pretvornik ima 7 otpora od  $1 \Omega$  do  $64 \Omega$  (binarno stupnjevanih) i da je pomoćna struja  $I_p = 1 \text{ mA}$ . Na početku sve su preklopke uključene što odgovara stanju "0".
- Usporedba počinje od najvažnije znamenke. Kada se isključi preklopka paralelno otporu od  $64 \Omega$ , kompenzacijski napon na njemu će biti  $U_k = 64 \text{ mV}$  i veći od mjenog napona ( $64 \text{ mV} > 23 \text{ mV}$ ), pa se sklopka vraća u prijašnji položaj
- Isključuje se sklopka paralelno otporu od  $32 \Omega$ . Kako je i tada napon na otporu viši od mjenog ( $32 \text{ mV} > 23 \text{ mV}$ ), postupak se ponavlja. Sklopka se zatvara i otvara se sklopka paralelno otporu od  $16 \Omega$ . Budući da je sada napon manji od mjenog ( $16 \text{ mV} < 23 \text{ mV}$ ) ta sklopka ostaje isključena što odgovara stanju "1"

# A/D pretvornik s postupnim približavanjem

---

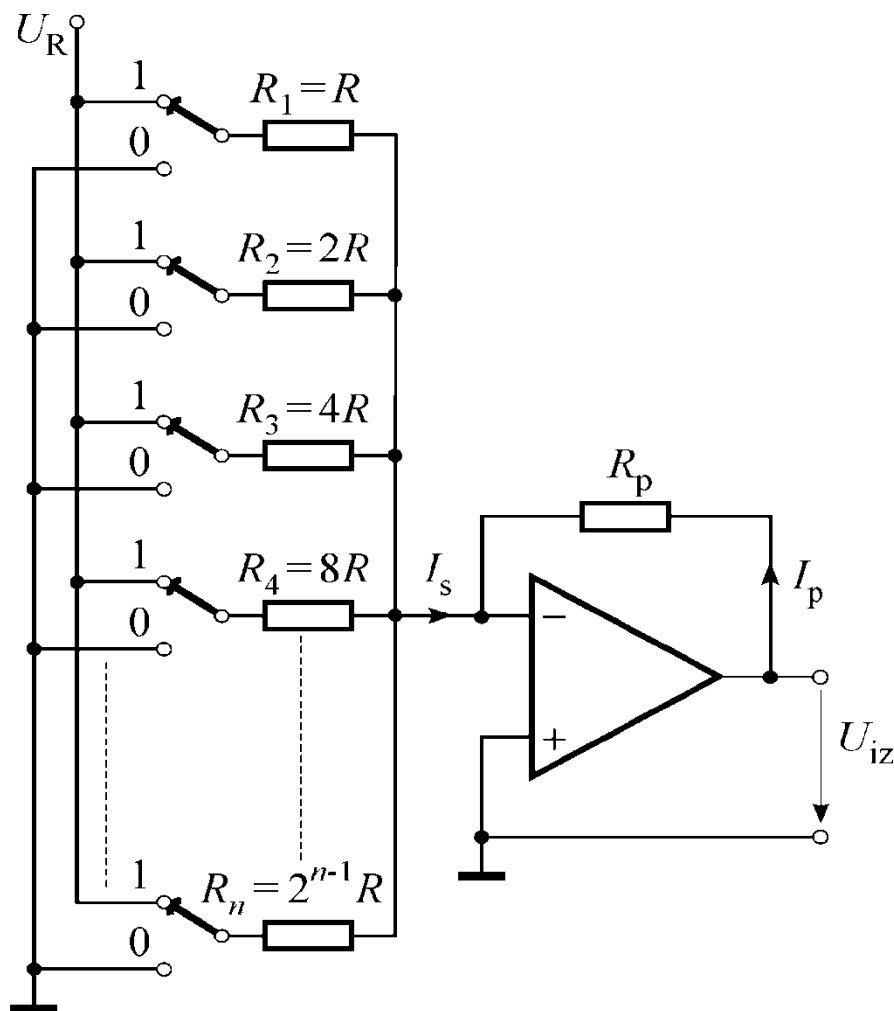
- Otvara se sljedeća sklopka paralelno otporu od  $8\ \Omega$ . Sada je ukupan napon opet veći od mjerenog pa se ta sklopka vraća u prijašnje stanje ( $16\text{ mV} + 8\text{ mV} = 24\text{ mV} > 23\text{ mV}$ ).
- Postupak se ponavlja dok se ne dobije napon jednak mjerenom, ili najbliži mjerenom naponu, što zapravo znači dok se ne ispita utjecaj i posljednje sklopke (bita) u nizu. U ovom slučaju to je postignuto kada su sklopke paralelno otporima  $64\ \Omega$ ,  $32\ \Omega$  i  $8\ \Omega$  uključene (stanje "0"), a sklopke paralelno ostalim otporima isključene (stanje "1"), pa se dobiva  $16\text{ mV} + 4\text{ mV} + 2\text{ mV} + 1\text{ mV} = 23\text{ mV}$ .
- Takav pretvornik mjeri trenutnu vrijednost napona. Stvarni stupnjevani A/D pretvornici umjesto binarno stupnjevanih otpora rade s binarno stupnjevanim naponima dobivenim iz digitalno-analognog pretvornika.

# Stvarni A/D pretvornik s postupnim približavanjem



- Koristi binarno stupnjevane napone koji se dobivaju iz digitalno – analognog pretvornika
- Usporedba počinje od najvažnije znamenke
- Izlaz iz komparatora dovodi se na upravljački sklop, koji preko registra upravlja D/A pretvornikom i iznosom napona na njegovom izlazu

# D/A pretvornik s linearno stupnjevanom otpornom mrežom



Pojedine struje su:

$$I_1 = \frac{U_R}{R_1} = \frac{U_R}{R}$$

$$I_2 = \frac{U_R}{R_2} = \frac{U_R}{2R}$$

$$I_n = \frac{U_R}{R_n} = \frac{U_R}{2^{n-1}R}$$

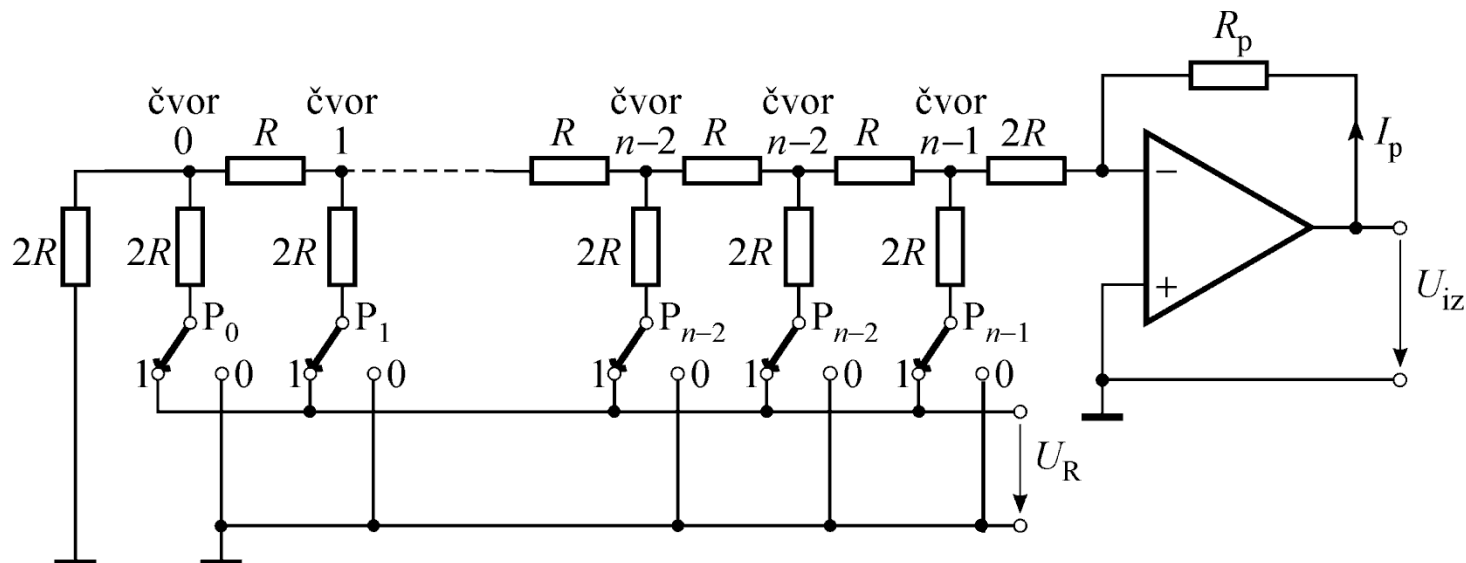
$$I_s = \sum_{i=1}^n \frac{a_i U_R}{2^{i-1}R}, \text{ } a_i \text{ je ili 0 ili 1.}$$

Kako je  $U_{iz} = I_p R_p = -I_s R_p$

$$\text{tako je } U_{iz} = -R_p \sum_{i=1}^n \frac{a_i U_R}{2^{i-1}R} = -\frac{U_R R_p}{R} \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{2^{i-1}}$$



# D/A pretvornik s otpornom ljestvičastom mrežom



- a)  $R_p = 3R$   
 b) za  $P_{n-1}=1$  i sve ostale jednake  $P_i=0$  potencijal čvora  $\varphi_{n-1} = U_R/3$  pa slijedi da je u izlaznom naponu doprinos čvora  $n-1$  jednak:

$$U_{iz(n-1)} = \frac{U_R}{3} \left( -\frac{3R}{2R} \right) = -\frac{U_R}{2}$$

# D/A pretvornik s otpornom ljestvičastom mrežom

- c) za  $P_{n-2}=1$  i sve ostale jednake 0 potencijal čvora  $\varphi_{n-2} = U_R/3$ , a potencijal čvora  $\varphi_{n-1} = \varphi_{n-2}/2$ , pa je doprinos čvora  $n-2$  u izlaznom naponu:

$$U_{iz(n-2)} = \frac{U_R}{6} \left( -\frac{3R}{2R} \right) = -\frac{U_R}{4}$$

- d) općenito vrijedi da je, uz  $a_i$  koji može biti ili 1 ili 0, izlazni napon jednak sumi doprinosa napona pojedinih čvorova:

$$U_{iz} = -\frac{U_R}{2^n} \sum_{i=0}^{n-1} a_i 2^i$$

- Potrebni su samo otpori iznosa  $R$  i  $2R$
- Trajanje pretvorbe je reda veličine mikrosekunde

# A/D pretvornik s postupnim približavanjem - prednosti i nedostaci

## □ Prednosti:

- Vrlo visoka brzina (10 do  $10^5$  uzoraka u sekundi)
- Dobra točnost (0,1% ili bolje)
- Pouzdan
- Srednja razlučivost (8 bita do 12 bita)

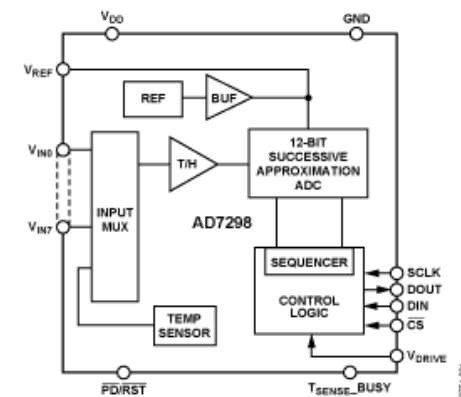
## □ Nedostaci:

- Vrlo osjetljiv na šum (mora se koristiti filter)
- Viša cijena od integrirajućih
- Točnost ograničena zbog D/A pretvornicima

## □ Uporaba:

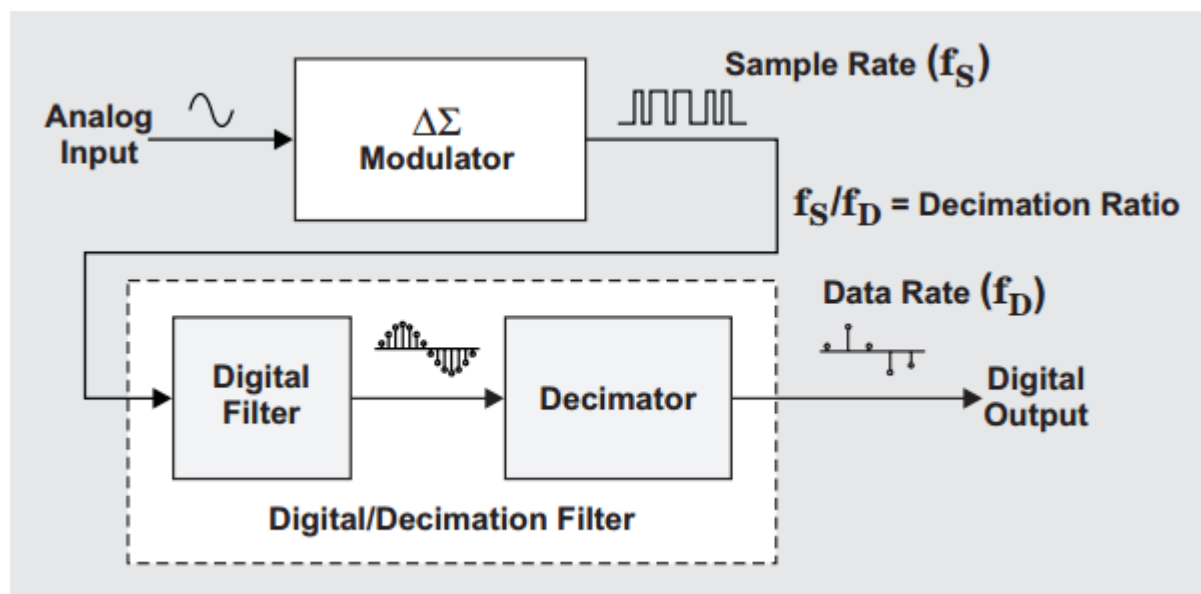
- Obrada signala
- Aplikacije gdje se ulazni signal mijenja relativno brzo

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM FOR AD7298



# Sigma-delta A/D pretvornik

- Sastoji se od:
  - Delta-sigma modulatora
  - Digitalnog filtra + decimatora - otklanjanje kvantizacijskog šuma i prilagodba duljine podataka



# Sigma-delta A/D pretvornik - prednosti i nedostaci

---

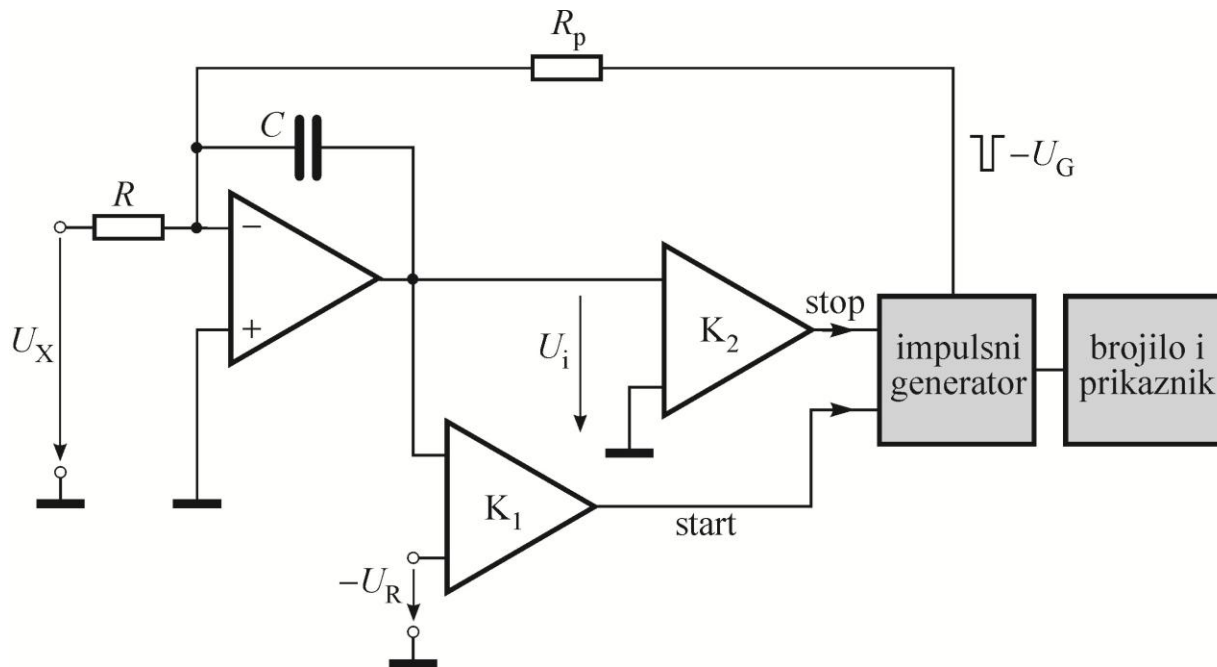
## □ Prednosti:

- Visoka razlučivost
- Visoki stupanj integracije
- Niska cijena

## □ Uporaba:

- Procesna kontrola
- Precizna mjerenja

# A/D pretvornik napona u frekvenciju



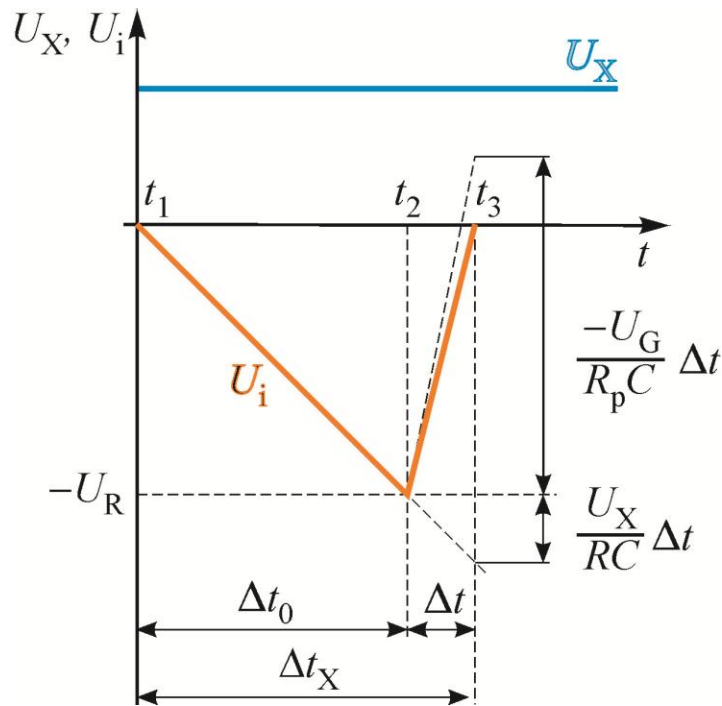
a)  $t_1 \leq t \leq t_2$  integriranje  
mjerelog napona  $U_X$  dok ne  
dosegne razinu  $-U_R$ :

$$\Delta t_0 = t_2 - t_1$$

$$U_i(t_2) = -\frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} U_X dt = -\frac{1}{RC} \bar{U}_X \Delta t_0 = -U_R$$

$$\Delta t_0 = \frac{U_R RC}{\bar{U}_X}$$

# A/D pretvornik napona u frekvenciju



b)  $t_2 < t \leq t_3$  integriranje i mjerenog napona  $U_X$  preko otpora  $R$  i napona  $-U_G$  preko otpora  $R_p$

$$\Delta t = t_3 - t_2$$

$$U_i(t_3) = U_i(t_2) - \frac{1}{RC} \int_{t_2}^{t_3} U_X dt - \frac{1}{R_p C} \int_{t_2}^{t_3} -U_G dt = 0$$

$$\Delta t = \frac{U_R}{\frac{U_G}{R_p C} - \frac{\bar{U}_X}{RC}}$$

c) za jedno punjenje i pražnjenje kondenzatora  $C$ , uz  $U_X \ll U_G$  i  $R_p \ll R$ , dobiva se jedan impuls u brojilu:

$$f_X = \frac{1}{\Delta t_X} = \frac{1}{\Delta t_0 + \Delta t} = \frac{\bar{U}_X \left( 1 - \frac{\bar{U}_X R_p}{U_G R} \right)}{U_R RC} \approx \frac{\bar{U}_X}{U_R RC}$$

# Rad s digitalnim multimetrima

## □ Primjer: Keysight 34461A 6½ Digital Multimeter





# Rad s digitalnim multimetrima

## ❑ Keysight 34461A 6½ Digital Multimeter\*

- Ulazne priključnice: Input HI, Input LO, Sense HI, Sense LO, I (3 A), I (10 A)
- Mjerna područja i opsezi (Ranges)
  - Istosmjerni napon (DC Voltage , DCV): 100 mV do 1000 V
  - Izmjenični napon (AC Voltage, ACV): 100 mV do 750 V, 3 Hz do 300 kHz, True RMS
  - Otpor (Resistance): 100  $\Omega$  do 100 M $\Omega$
  - Istosmjerna struja (DC Current, DCI): 100  $\mu$ A do 10 A
  - Izmjenična struja (AC Current, ACI): 100  $\mu$ A do 10 A, 3 Hz do 10 kHz, True RMS
  - Kapacitet (Capacitance) : 1 nF do 100  $\mu$ F
  - Frekvencija (Frequency): 10 Hz do 300 kHz
  - ...
- Prikaz (Resolution): do 6½ znamenaka
- Specifikacije točnosti (Accuracy specifications):  $\pm$  ( $a\%$  of reading +  $b\%$  of range)
  - *These specification are compliant to ISO/IEC 17025 for k = 2*

\* *Napomena: pojmovi su namjerno zapisani na engleskom jeziku jer je vjerojatnost da ćete naći upute pripremljene (od strane proizvođača) na hrvatskom jeziku vrlo mala - to ne vrijedi samo za ovaj tip instrumenta nego općenito!*

# Rad s digitalnim multimetrima

---

## ❑ Keysight 34461A 6½ Digital Multimeter

### ▪ Napredne postavke i funkcije:

- Izbor Aperture NPLC
- Definiranje okidanja (trigger settings)
- Korištenje funkcija Auto Zero
- Izbor 2-žičnog ili 4-žičnog mjerenja otpora
- Korištenje funkcije OffsetComp
- Korištenje funkcije DCV Ratio
- Korištenje funkcije Data Logging
- Korištenje funkcije Digitizing
- Korištenje ugrađenih matematičkih funkcija

### • Programiranje instrumenta

- SCPI
- Komunikacijska sučelja
- Upravljanje s pomoću računala

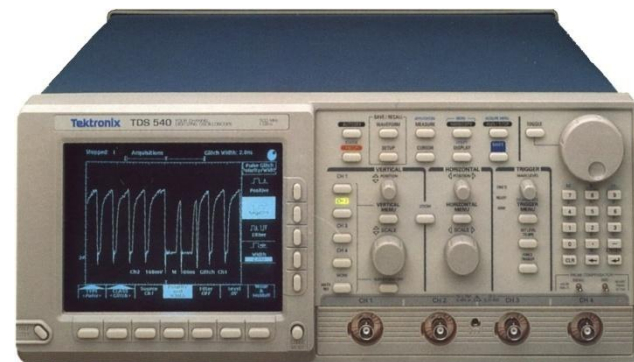
- Ovo su samo osnovne informacije, a za bilo kakvo daljnje postupanje, odnosno za rad s mjernim instrumentom, potrebno je pogledati upute proizvođača (Instruction manual, Operator's manual, ili sličan dokument)

**Pregled dokumenta! ➡ Rad na laboratorijskim vježbama!**

# Osciloskopi - važni instrumenti

## ■ Analogni i digitalni osciloskopi

- mjerni uređaji za dvodimenzijski prikaz trenutnih (ili drugih) vrijednosti jedne ili više brzo promjenjivih električnih veličina u vremenskoj domeni
- analogne i digitalne izvedbe, prijenosni osciloskopi (scopemeter)



# Digitalni osciloskopi - općenito

---

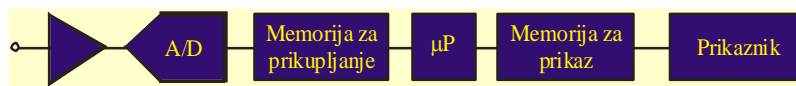
- **Prvi digitalni osciloskopi pojavili su se krajem sedamdesetih godina prošlog stoljeća, kao uređaji kojima se signal može "pamtiti" neograničeno dugo (što je bilo jedno od osnovnih ograničenja analognih osciloskopa)**
- **Njihove različite konstrukcije, svojstva, način prikaza te dodatne funkcije i mogućnosti prilagođeni su točno određenom segmentu u širokoj lepezi njihove primjene (npr. području telekomunikacija, VF tehnike, razvoju digitalnih sustava i slično)**
- **U pogledu načina uzorkovanja signala, njegove obrade i/ili prikaza razlikujemo:**
  - DSO (Digital Storage Oscilloscope)
  - DPO (Digital Phosphor Oscilloscope)
  - SO (Sampling Oscilloscope)
- **Načini slaganja prikaza na zaslonu prema uzetim uzorcima**
  - slijedni prikaz (sample mode, slično prikazu kod analognih osciloskopa) - vremenski razmak između uzetih uzoraka (sample interval) odgovara vremenskom intervalu točaka prikaza (waveform interval)
  - peak detect mode, envelope mode, average mode - omogućuju drugačije analize prikupljenih uzoraka

# Digitalni osciloskopi - DSO

## □ Način rada

- prikladni su za niskofrekvencijske i brze impulsne signale te za istodobno promatranje više signala (imaju do četiri ulazna kanala)
- serijskim ustrojem za obradu signala promatrani signal se uzorkuje, a svaki se uzorak A/D pretvornikom pretvara u digitalnu informaciju koja se pohranjuje u memoriji za prikupljanje
- kad se prikupi dovoljno uzoraka za jednu sliku na prikazniku, oni se povlače iz memorije, obrađuju u mikroprocesoru te prosljeđuju u memoriju za prikaz koja šalje informacije na prikaznik
- za određeni vremenski interval, dok traje obrada uzoraka i čekanje na novo okidanje (tzv. holdoff-time), mjereni signal se uopće ne uzorkuje - gubimo informaciju o njegovim promjenama tijekom tog intervala
- osnovni podaci za DSO: frekvencijski opseg (npr. 1 GHz), frekvencija uzorkovanja (do 10 GS/s) te duljina zapisa (record length) po kanalu (npr. do 120000 točaka)

## □ Pojednostavljena blok-shema

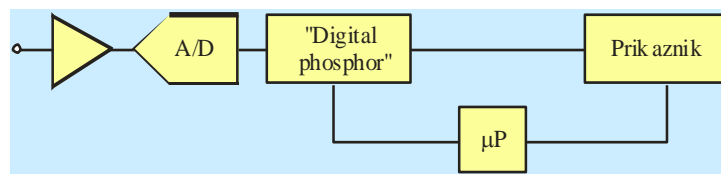


# Digitalni osciloskopi - DPO

## □ Način rada

- od DSO-a se razlikuje po paralelnom ustroju za obradu signala
- uzorci se pretvaraju (rasteriziraju) u trodimenzionalni oblik u bazi podataka (tzv. "digital phosphor") te prosljeđuju izravno na prikaznik
- tri dimenzije su: amplituda, vrijeme te razdioba amplitude po vremenu, koja se prikazuje različitom svjetlinom ili različitim bojama (daje informaciju o ponovljivosti valnog oblika)
- matematička analiza uzoraka ide paralelnom stazom preko mikroprocesora (puno brže od tipičnog DSO-a)
- osnovni podaci za DPO: frekvencijski opseg (nekoliko gigaherca), frekvencija uzorkovanja (do 20 GS/s) te duljina zapisa (record length) po kanalu (npr. do  $3 \cdot 10^7$  točaka)
- prikladni su za prikaz i analizu vrlo složenih signala, npr. modulacija u video i telekomunikacijskoj tehnici

## □ Pojednostavljena blok-shema



# Digitalni osciloskopi - SO

---

## □ Način rada

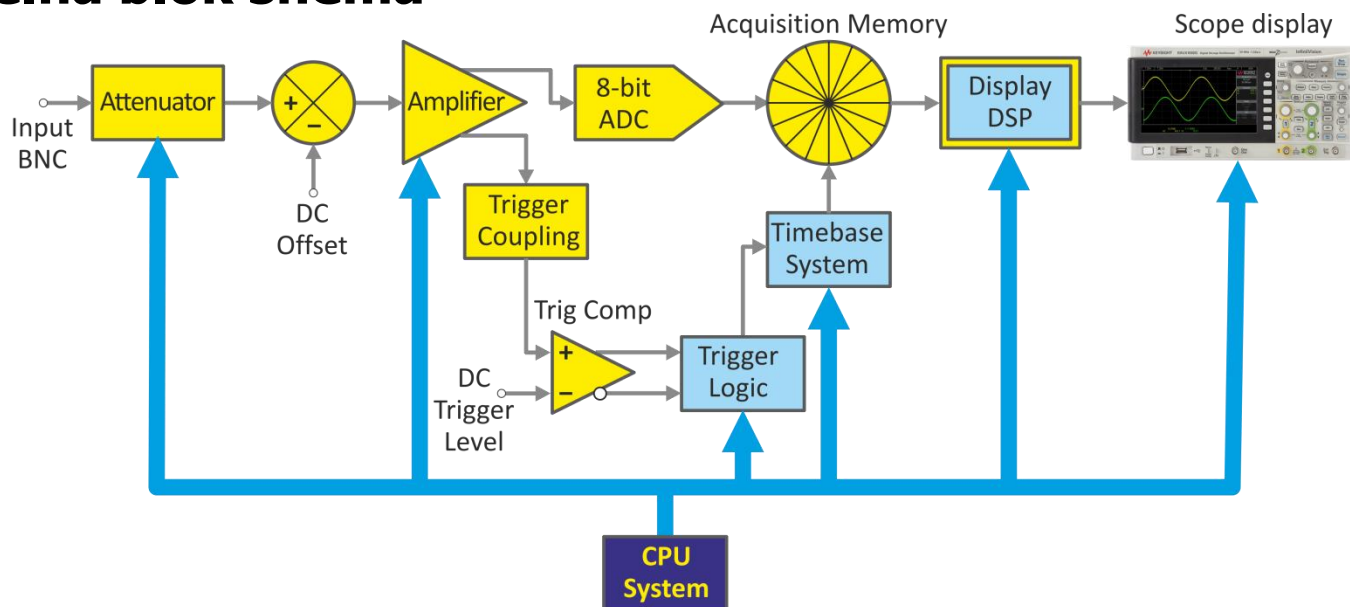
- predviđen je za visokofrekvencijske periodičke signale reda veličine više desetaka gigaherca i po svojoj je konfiguraciji sličan DSO-u - razlika je u njegovu ulaznom dijelu i načinu uzorkovanja
- ulazni signal prvo se uzorkuje pa tek onda pojačava, pri čemu se rabi metoda uzorkovanja u "ekvivalentnom" vremenu (*equivalent-time sampling*) kod koje se za slaganje jedne periode na prikazu uzorci uzimaju tijekom više perioda mjenog napona
- omogućeno je uzorkovanje signala čija je frekvencija puno viša od frekvencije uzorkovanja, uz uvjet da je signal periodička funkcija
- kako je u slijedu iza ulaza prvi sklop za uzorkovanje (čija je dinamika ograničena), a ne pojačalo, najveći je dozvoljeni ulazni napon svega nekoliko volta (kod DSO-a i DPO-a on iznosi i nekoliko stotina volta)
- duljina zapisa je puno manja (svega par tisuća točaka)

# Digitalni osciloskopi

## □ Osnovni dijelovi digitalnog osciloscopa tipa DSO

- ulazno djelilo i/ili pretpojačalo
- 8-bitni A/D pretvornik
- okidni sustav
- vremenska baza
- memorija za prikupljanje
- prikaznik

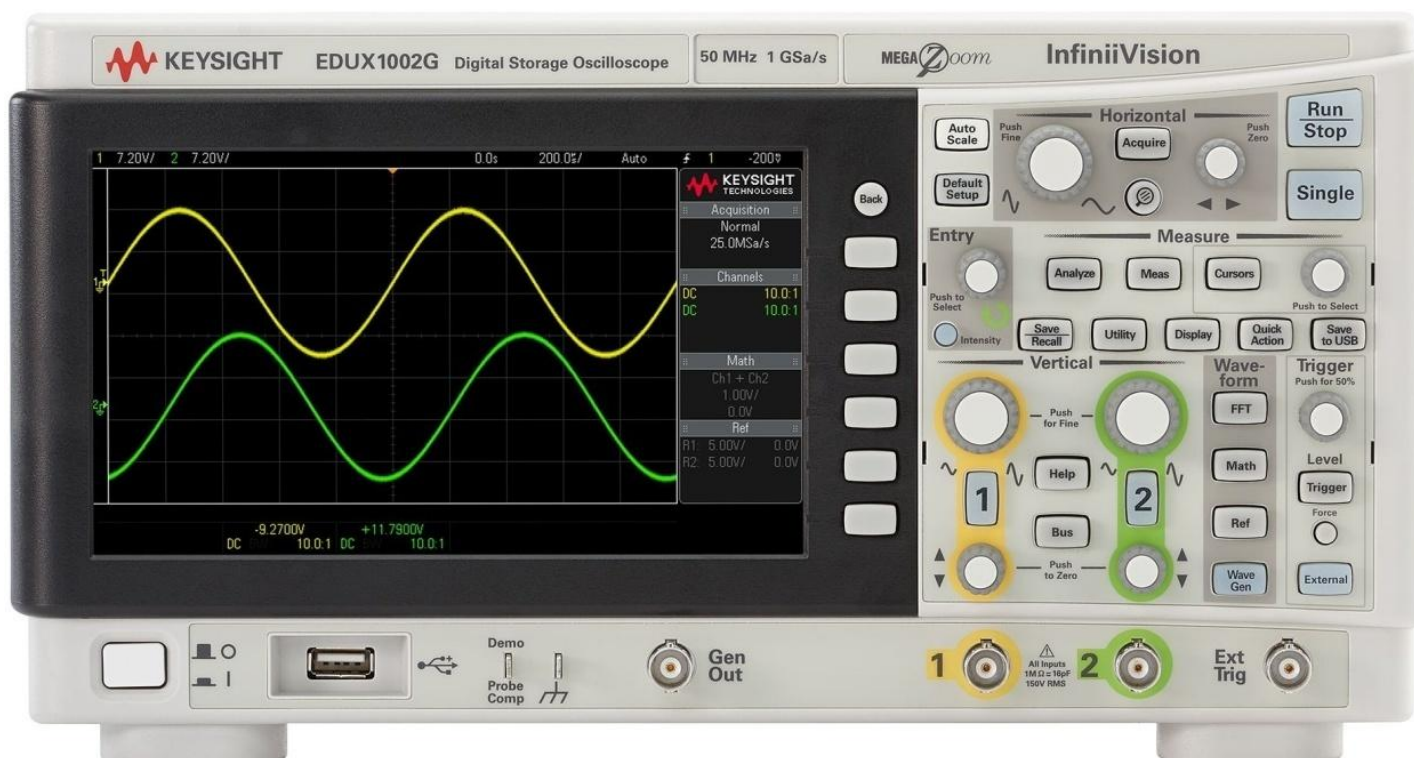
## □ Načelna blok shema





# Rad s digitalnim osciloskopima

## □ Primjer: Keysight EDUX1002G Digital Storage Oscilloscope



# Rad s digitalnim osciloskopima

---

## □ Keysight EDUX1002G Digital Storage Oscilloscope

- Analogni kanali (Analog channels) : 2
- Frekvencijski opseg (Bandwidth): 50 MHz
- Maksimalna frekvencija uzorkovanja (Maximum sample rate): 1 GSa/s
- Funkcijski generator (Function generator): 20 MHz
- Učestalost ažuriranja valnog oblika (Waveform update rate): 50 000 s<sup>-1</sup>
- Razlučivanje (Resolution): 8 bita
- Matematičke operacije s valnim oblikom (Waveform math): zbrajanje, oduzimanje, množenje, dijeljenje, FFT (Fast Fourier Transform, amplituda i faza), NP filter (low pass filter)
- ...

## □ Osnovne postavke:

- izbor ulazne veze: DC Coupling (istosmjerna i izmjenična komponenta) ili AC Coupling (samo izmjenična komponenta)
- postavke horizontalne osi (otklona)
- postavke vertikalne osi (otklona)
- postavke okidanja
- odabir mjerenih veličina

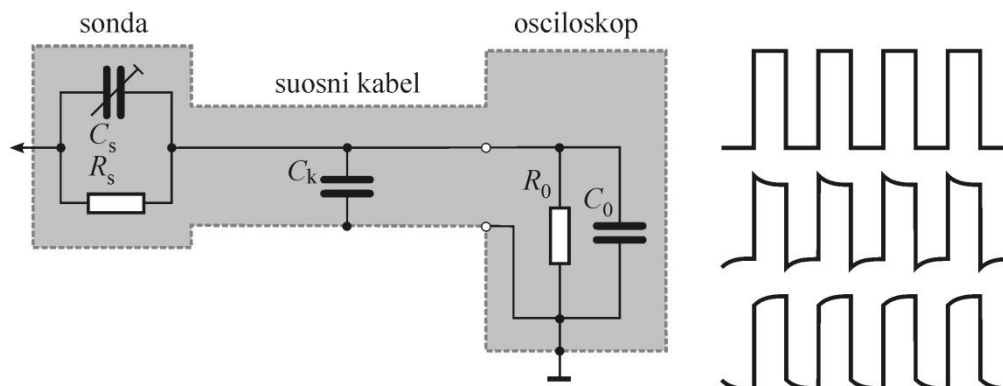
# Rad s digitalnim osciloskopima

## ■ Kompenziranje pasivne sonde:

- za mjerenje napona viših od dozvoljenog maksimalnog ulaznog napona koristi se sonda 10:1 kojom se signal umanjuje 10 puta
- ako je  $R_0$  ulazni otpor osciloskopa (tipično  $1\text{ M}\Omega$ ),  $C_0$  ulazni kapacitet osciloskopa (npr.  $15\text{ pF}$ ),  $C_k$  kapacitet kabla, a otpor sonde  $R_s = 9\text{ M}\Omega$ , tada je potrebno ugoditi kapacitet sonde  $C_s$  da bude zadovoljen uvjet:

$$R_s C_s = R_0 (C_0 + C_k)$$

- sonda se spaja na izvor pravokutnog signala, a na zaslonu osciloskopa potrebno je dobiti neizobličeni pravokutni signal – tada je sonda kompenzirana

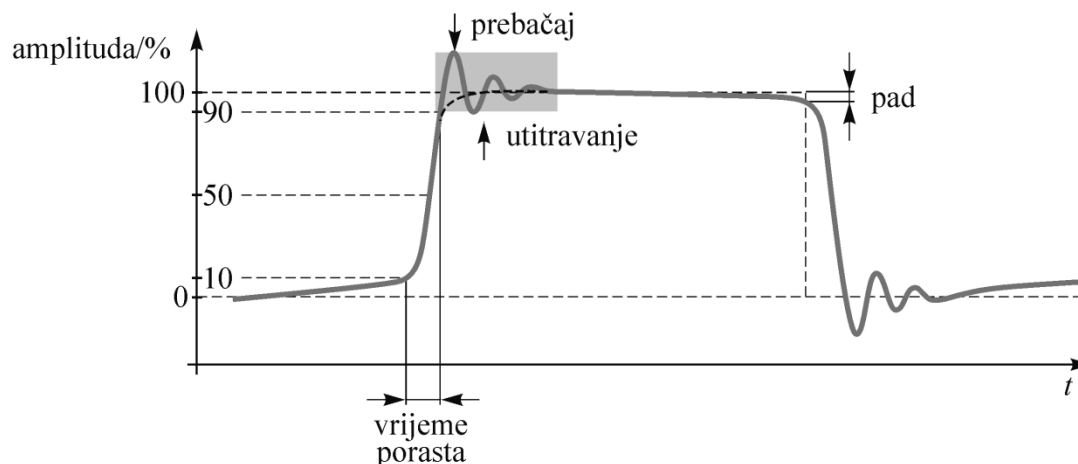


# Rad s digitalnim osciloskopima

## ■ Mjerenje vremena porasta signala:

- to je vremenski interval između točaka signala kod kojih je amplituda u odnosu na konačnu vrijednost jednaka 90 % ( $t_{90}$ ) i 10 % ( $t_{10}$ )
- parametar se naziva vrijeme porasta (*rise time*):  $t_r = t_{90} - t_{10}$
- vrijeme porasta osciloskopa određuje se prema njegovoj gornjoj graničnoj frekvenciji  $f_g$ :  $t_{r0} = 0,35/f_g$
- pri mjerenju vremena porasta  $t_{rs}$  mjerenog signala, izmjerenu vrijednost  $t_{rm}$  moramo ispraviti za utjecaj osciloskopa izrazom:

$$t_{rs} = \sqrt{t_{rm}^2 - t_{r0}^2}$$



# Rad s digitalnim osciloskopima

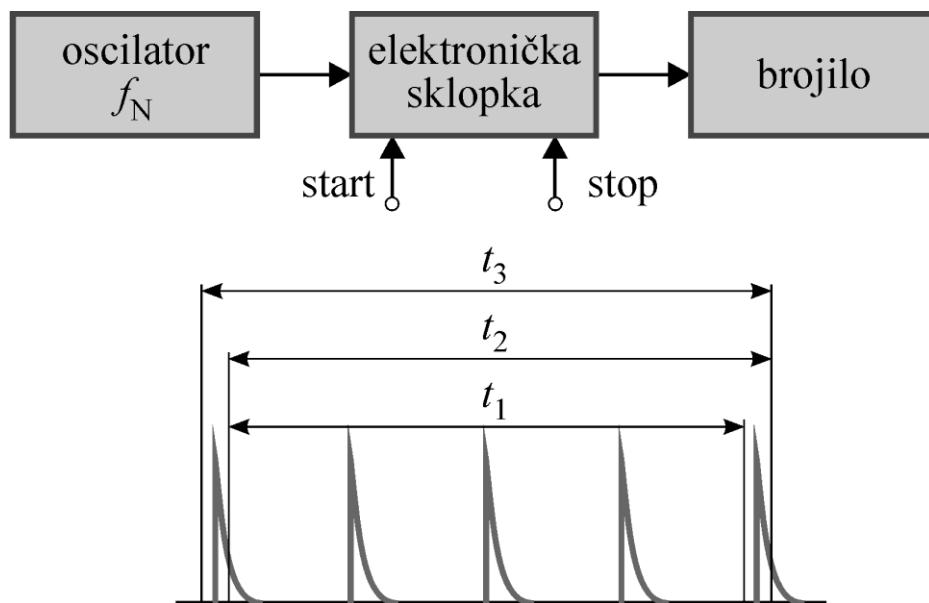
---

## ▣ Osciloskop kao mjerni instrument

- korištenje kursora
  - mjerenje neperiodičkih pojava (single-shot event)
  - prikaz i mjerenja signala u frekvencijskoj domeni (FFT)
  - korištenje ugrađenih matematičkih funkcija
  - korištenje ugrađenog generatora signala
- 
- Ovo su samo osnovne informacije, a za bilo kakvo daljnje postupanje, odnosno za rad s mjernim instrumentom, potrebno je pogledati upute proizvođača (Instruction manual, Operator's manual, ili sličan dokument)

**Pregled dokumenta! ➡ Rad na laboratorijskim vježbama!**

# Univerzalni brojači - mjerenje vremena

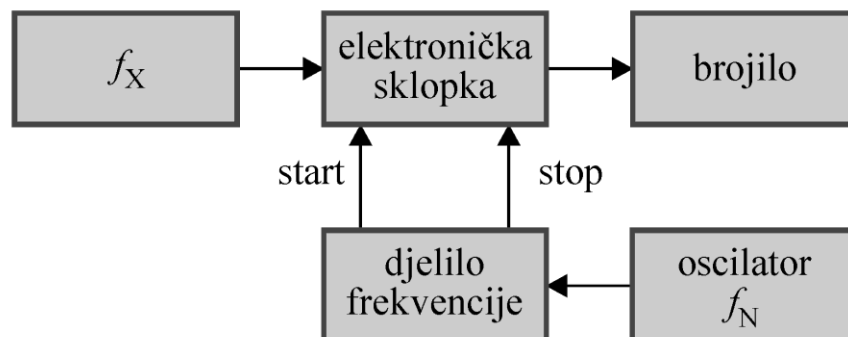


**Pojava** čije trajanje mjerimo **upravlja ulazima** start i stop, a u aktivnom vremenskom intervalu prolaze impulsi iz izvora stalne i poznate frekvencije  $f_N$  u brojilo impulsa

Vrijeme  $t$  određujemo iz broja impulsa  $N$  koje je brojilo prebrojilo:

$$t = N / f_N$$

# Univerzalni brojači - mjerenje frekvencije



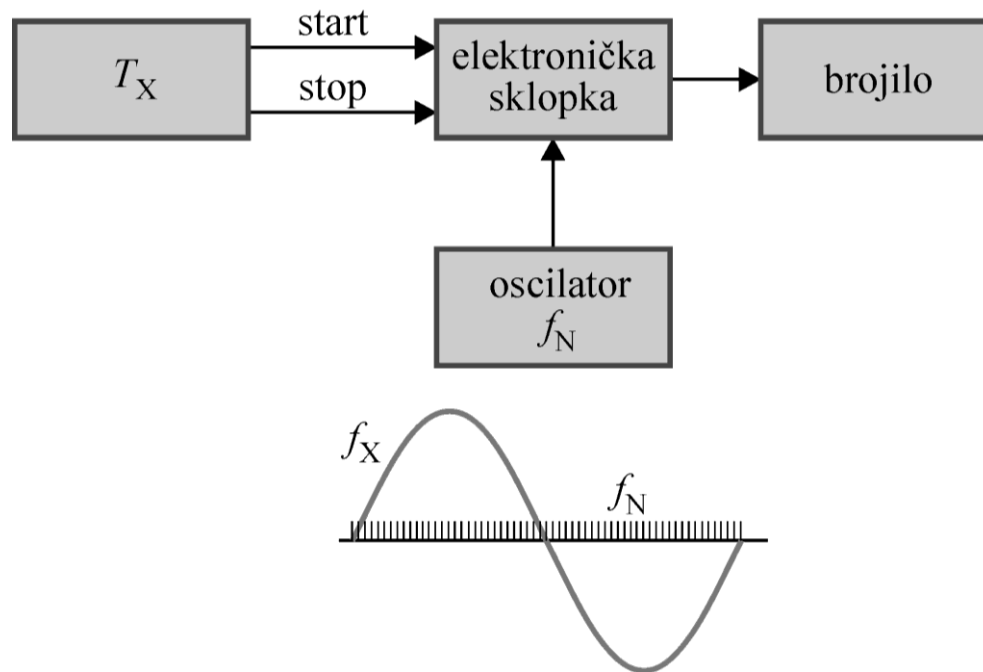
Brojilo mjeri impulse točno određeno vrijeme.

Impulsi iz oscilatora privode se elektroničkoj sklopki preko djelila frekvencije.

Prvi impuls "zatvara" sklopku pa ona propušta impulse frekvencije  $f_X$  u brojilo, a drugi točno nakon jedne sekunde je "otvara" i to se prekida.

Postupak je prikladan za više i visoke frekvencije, jer je tada broj izbrojenih impulsa veći, pa pogriješka od  $\pm 1$  impulsa manje utječe na točnost mjerenja.

# Univerzalni brojači - mjerenje periode



Pri mjerenju niske frekvencije bolje je mjeriti trajanje jedne periode (ili 10, 100, 1000 perioda).

Jedan impuls iz mjernog izvora "zatvara" sklopku (start), a drugi je "otvara" (stop), dok brojilo u međuvremenu broji impulse iz oscilatora.



# Zaključak

---

- **Prikazali smo načela rada digitalnih multimetara i digitalnih osciloskopa**
- **I kod digitalnih instrumenata pokazivanje instrumenta ovisi o valnom obliku mjerene veličine, što može prouzročiti pogrešku u mjerenju**
- **Svaki tip instrumenta ima svoje područje primjene, prednosti i nedostatke koje je potrebno poznavati**
- **Kod digitalnih instrumenata redovito je potrebno proučiti upute proizvođača i postupati u skladu s njima**