

Prof. dr Zoran Veličković, dipl. inž. el.

# ELEKTRONSKA MERNA INSTRUMENTACIJA

Analogni voltmetri naizmeničnog napona

(6)



# Sadržaj

## ▶ **VOLTMETRI NAIZMENIČNOG NAPONA (AC)**

- ▶ Arhitekture AC voltmetara
  - ▶ Ispravljač – pojačavač
  - ▶ Pojačavač – ispravljač
- ▶ Realizacija mernih ispravljača

## ▶ **KARAKTERISTIČNE VELIČINE NAIZMENIČNOG NAPONA**

- ▶ Srednja, efektivna i vršna vrednost
- ▶ Faktor oblika, k – faktor
- ▶ Vršni (crest) – faktor
- ▶ Složeno-periodični signali
- ▶ Faktori karakterističnih signala

## ▶ **MERNI ISPRAVLJAČI AC VOLTMETARA**

- ▶ Sa odzivom na srednju vrednost napona
  - ▶ Jednostrani merni ispravljači
  - ▶ Dvostrani merni ispravljači
- ▶ Sa odzivom na vršnu vrednost napona
- ▶ Sa odzivom na efektivnu vrednost napona
  - ▶ Voltmetri kvazi-efektivne vrednosti
  - ▶ Voltmetri prave-efektivne vrednosti

## ▶ **SPECIJALNE KLASE AC VOLTMETARA**

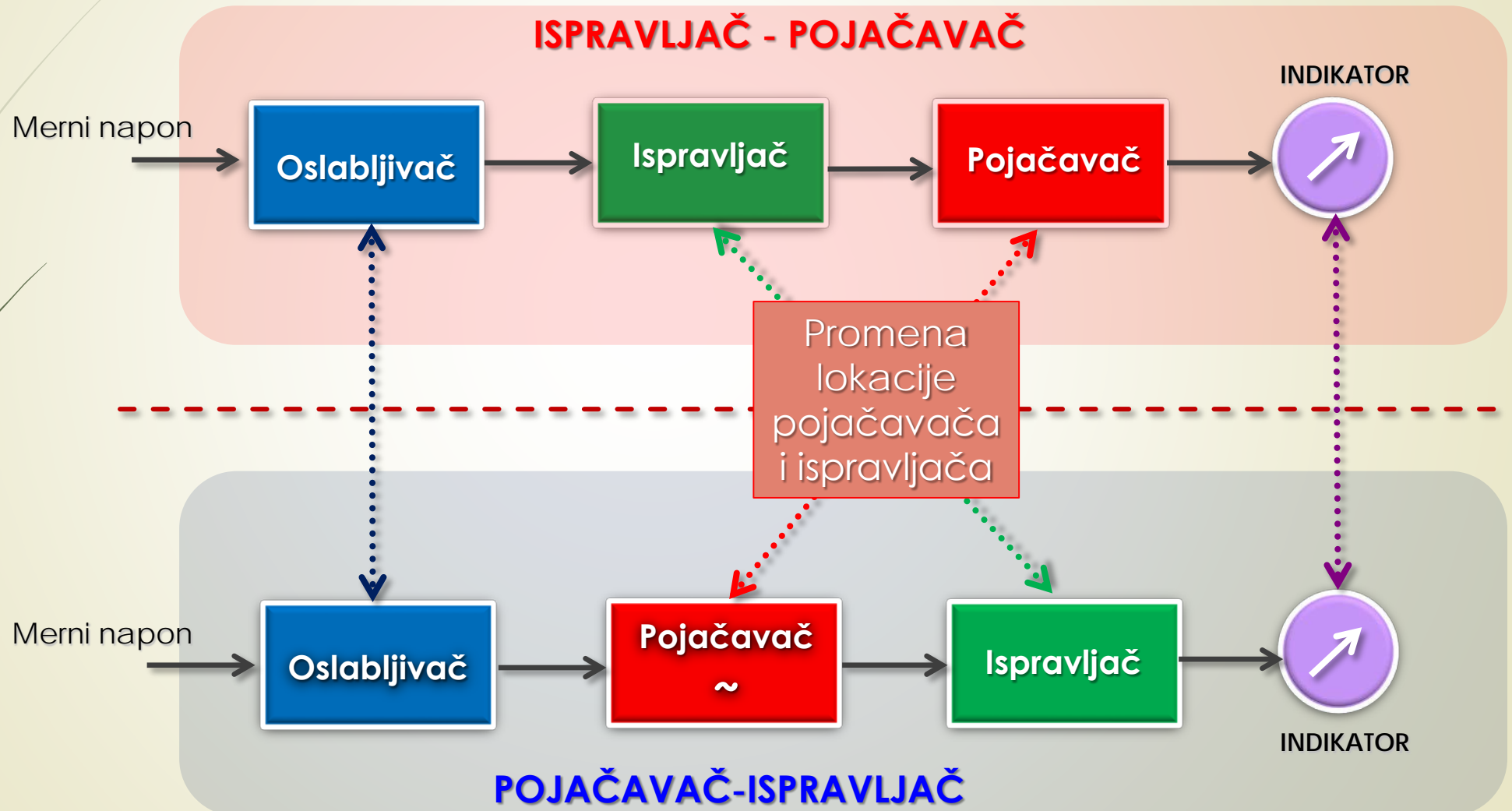
- ▶ Vektorski voltmetar
- ▶ Selektivni voltmetar

## ▶ **ZADACI**

# Arhitekture AC voltmetara

- ▶ **IZUZETNO DOBRE** metrološke karakteristike voltmetara za **JEDNOSMERNI NAPON**, doprinele su njihovoj primeni u voltmetrima **NAIZMENIČNIH NAPONA** (Lab. vežba br. 2).
- ▶ Da bi voltmetri **JEDNOSMERNOG NAPONA** mogli da se primene u merenju **NAIZMENIČNOG NAPONA**, pored sklopova kao što su:
  - ▶ Pojačavači,
  - ▶ Atenuatori (oslabljivači),
  - ▶ Indikatori
  - ▶ **ISPRAVLJAČ!**
- ▶ U praksi se susreću **DVA TIPA** blok šema – arhitektura elektronskih voltmetara naizmeničnih napona koji su bazirani na voltmetrima jednosmernih napona:
  - ▶ **ISPRAVLJAČ - POJAČAVAČ**
  - ▶ **POJAČAVAČ - ISPRAVLJAČ**

# Blok šeme AC Voltmetara



# Realizacija mernih ispravljča

- ▶ **MERNI ISPRAVLJAČI** se mogu realizovati sa:
  - ▶ Odzivom na **SREDNJU** vrednost merenog napona;
  - ▶ Odzivom na **VRŠNU** vrednost merenog napona;
  - ▶ Odzivom na **EFEKTIVNU** vrednost merenog napona.
- ▶ Od izbora **MERNOG ISPRAVLJAČA** zavise **MERNE KARAKTERISTIKE** voltmetra za nizmenični (AC) napon, kao i **OBLAST NJEGOVE PRIMENE**.
- ▶ Razlog ovome leži u **GREŠCI** koju unosi **MERNI ISPRAVLJAČ** u voltmetru naizmeničnog napona jer se njemu pripisuje **NAJVEĆI UDEO** u **UKUPNOJ GREŠCI MERENJA!**
- ▶ Proučićemo sva **TRI TIP**a pomenuta **MERNIH ISPRAVLJAČA** i tri specifična voltmetra naizmeničnog napona:
  - ▶ Analogni voltmetar **PRAVE EFEKTIVNE VREDNOSTI**;
  - ▶ **VEKTOR** voltmetar i
  - ▶ **SELEKTIVNI** voltmetar.

# Srednja, vršna i efektivna vrednost

- ▶ **NAIZMENIČNI NAPON** je **PROMENLJIVA** električna veličina **U VREMENU**, tako da je za njegovo prikazivanje neophodan dvodimenzioni (**2D**) merni instrument koji omogućava **ISTOVREMENI PRIKAZ NAPONA i VREMENA!**
- ▶ Sa druge strane, elektronski voltmetar je **JEDNODIMENZIONALNI** merni instrument, i sa njim je moguće prikazati samo **JEDAN** od parametara (konstantan u vremenu) koji karakterišu naizmenični napon (to može biti: **SREDNJA, VRŠNA** ili **EFEKTIVNA** vrednost merenog napona).
- ▶ U praksi, **UOBIČAJENO** je da se koriste elektronski voltmetri koji pokazuju **EFEKTIVNU VREDNOST** merenog napona.
- ▶ Međutim, zbog svojih dobrih osobina najviše se primenjuju ispravljajući kod kojih je **ISPRAVLJENI NAPON SRAZMERAN SREDNJOJ VREDNOSTI** (a ne efektivnoj vrednosti) ulaznog naizmeničnog napona.
- ▶ Dakle, u praksi se najčešće **MERI SREDNJA VREDNOST** napona, ali se prikazuje njegova **EFEKTIVNA VREDNOST!**

# Matematičke definicije form i crest faktora

- Definicioni obrazac **SREDNJE VREDNOSTI** napona

$$U_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt$$

- Definicioni obrazac **EFEKTIVNE VREDNOSTI** napona

$$U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (u^2(t)) dt}$$

- Definicija **FORM FAKTORA** (k)

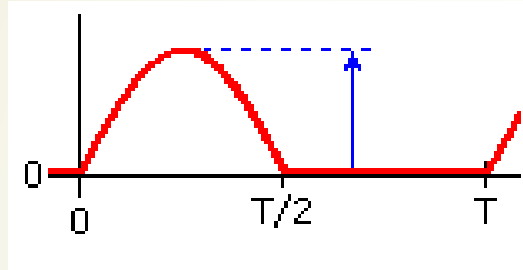
$$k = \frac{U_{eff}}{U_{sr}}$$

- Definicija **CREST (vršni) FAKTORA** (c)

$$c = \frac{U_{max}}{U_{eff}}$$

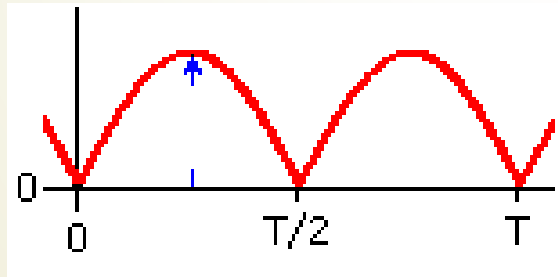
# K faktor za sinusne poznate talasne oblike

- Vrednost **k** - faktora za **JEDNOSTRANO** ispravljenu sinusoidu je 1.57.



$$k = \frac{U_{eff}}{U_{sr}} = \frac{\frac{U_m}{2}}{\frac{U_m}{\pi}} = \frac{\pi}{2} = 1.57$$

- Vrednost **k** - faktora za **DVOSTRANO** ispravljenu sinusoidu je 1.11.



$$k = \frac{U_{eff}}{U_{sr}} = \frac{\frac{U_m}{\sqrt{2}}}{\frac{2U_m}{\pi}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.11$$

- Detaljno izvođenje je dato u praktikumu !



# Form faktor i efektivna vrednost

- ▶ Iz definicionih obrazaca za **FORM FAKTOR** jasno je da se **EFEKTIVNA VREDNOST NAPONA** može izračunati ako se poznaje **FORM FAKTOR** (ili **FAKTOR OBLIKA**) merenog signala i njegova **SREDNJA VREDNOST**.
- ▶ Tako se realizacija analognih elektronskih voltmetra naizmeničnog napona zasniva na **MERENJU SREDNJE VREDNOSTI** signala, a prikazuje se **EFEKTIVNA VREDNOST**, što se ostvaruje **BAŽDARENJEM SKALE** u **EFEKTIVNIM VREDNOSTIMA NAPONA**.
- ▶ Kod digitalnih voltmetara ova **KOREKCIJA** se obavlja **DIGITALNIM MNOŽENJEM** rezultata merenja (srednje vrednosti) pre prikaza:

$$k = \frac{U_{eff}}{U_{sr}}$$

$$U_{eff} = kU_{sr}$$

- ▶ **FAKTOR OBLIKA**  $k$ , koji se definiše kao odnos efektivne i srednje vrednosti signala, određuje **KONSTANTU MNOŽENJA** kod digitalnih voltmetara (**PODRAZUMEVA** se dvostrano ispravljeni sinusoidalni signal čiji je  $k$ -faktor  $k = 1.11$ ).

# Sinusoidalni talasni oblici

- ▶ Praktična merenja se uglavnom obavljaju nad signalima čiji je talasni oblik upravo **SINUSOIDALNI**, tako da je ovakvo indirektno rešenje sasvim **ZADOVOLJAVAJUĆE** i znatno **JEFTINIJE** nego izrada voltmetra **PRAVE EFEKTIVNE VREDNOSTI**.
- ▶ Merenje ovim tipom voltmetra **NESINUSOIDALNIH TALASNIH OBLIKA** sa faktorom  $k=1.11$ , **PROUZROKOVAĆE GREŠKU !**
- ▶ Veličina ove greške je proporcionalna **STEPENU Odstupanja** talasnog oblika merenog signala **OD SINUSOIDNOG** talasnog oblika, tj. **IZOBLIČENJU MERENOG SIGNALA**.
- ▶ Primera radi, kod merenja signala pravougaonog talasnog oblika, kod kojeg su srednja, vršna i efektivna vrednost **JEDNAKE**, greška je očigledno **+11%**!

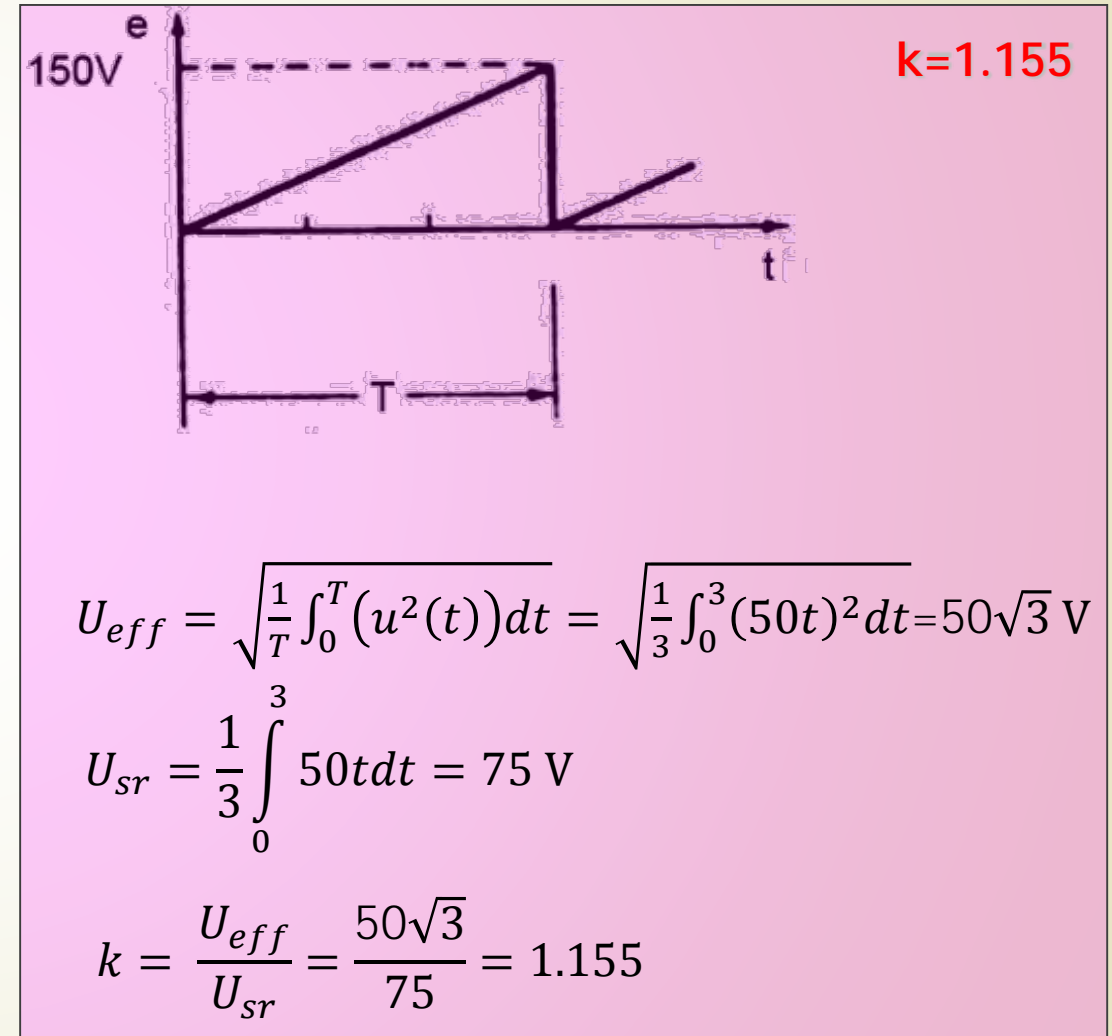
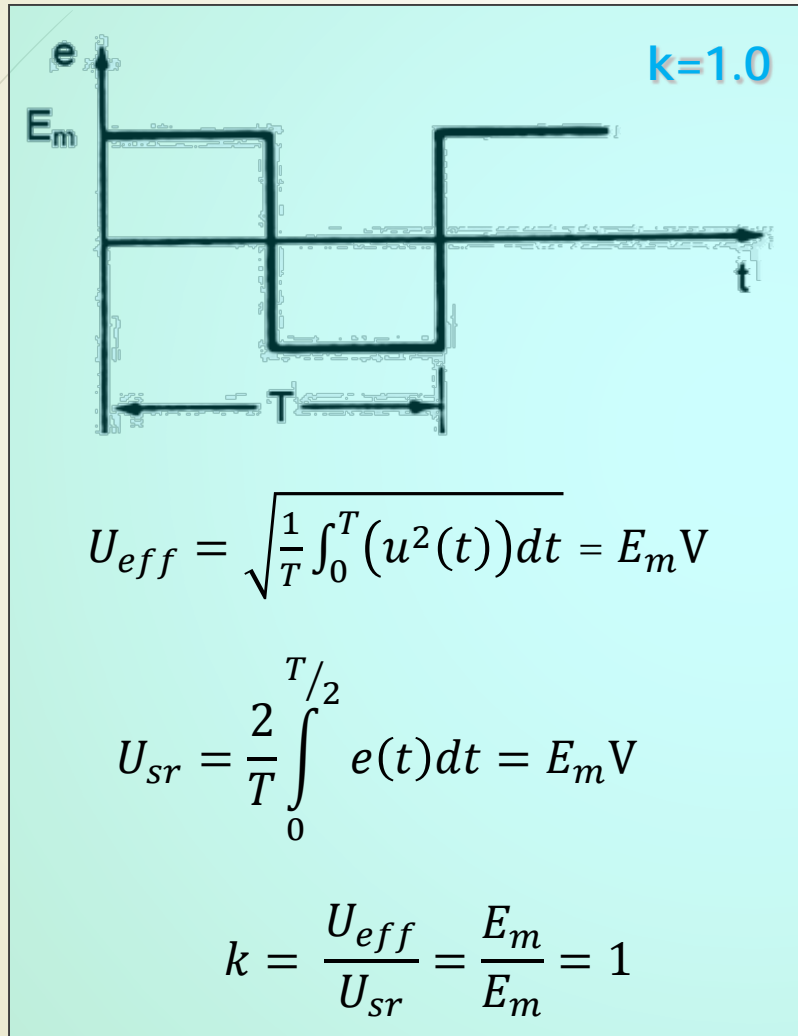
# Merenje složenoperiodičnih signala

- ▶ Dakle, u slučaju signala sa **VELIKIM IZOBLIČENJEM U ODNOSU NA SINUSNI** (a to je upravo pravougaoni talasni oblik), voltmetrom efektivne vrednosti sa ispravljačem sa odzivom na srednju vrednost moguće je meriti samo **SREDNJU VREDNOST NAPONA** množeći pokazanu (efektivnu) vrednost sa 0,9.
- ▶ Kod merenja **SLOŽENOPERIODIČNIH SIGNALA**, greška će zavisiti i od **AMPLITUDE HARMONIKA**, njegovog **REDA** i **FAZNOG STAVA**.
- ▶ Postojanje **DRUGOG HARMONIKA** sa amplitudom **10%** odnosno **30%** od amplitude **OSNOVNOG HARMONIKA**, proizvodi grešku od **0.5%**, do **4,2%**, respektivno u zavisnosti od **FAZNOG UGLA**.
- ▶ Kod voltmetra **EFEKTIVNE VREDNOSTI** sa ispravljačem sa odzivom na **VRŠNU VREDNOST**, skala indikatora se takođe **BAŽDARI** u **EFEKTIVNIM VREDNOSTIMA** napona!

# Vršni faktor i efektivna vrednost




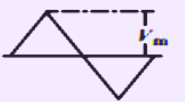

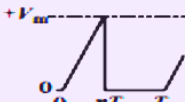
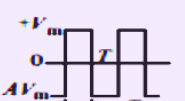

- ▶ **VRŠNI** (engl. *crest*) **FAKTOR** je definisan kao odnos  $U_m/U_{\text{eff}}$ , i za **SINUSOIDALNI** talasni oblik očigledno iznosi **1.41**.
- ▶ Merenje efektivne vrednosti napona voltmetrom sa vršnim ispravljačem će imati **VEĆU GREŠKU** za iste **NESINUSOIDALNE TALASNE OBLIKE** u odnosu na merenja sa voltmetrom koji poseduje ispravljač sa odzivom na srednju vrednost!
- ▶ Ukoliko se voltmetar **EFEKTIVNE VREDNOSTI** realizuje sa **ISPRAVLJAČEM** sa odzivom na efektivnu vrednost, odstupanje talasnog oblika merenog signala od sinusoidnog talasnog oblika **NEĆE IMATI UTICAJ NA GREŠKU** instrumenta.
- ▶ Voltmetri sa ispravljačem **SA ODZIVOM NA EFEKTIVNU VREDNOST** nazivaju se **VOLTMETRI PRAVE EFEKTIVNE VREDNOSTI** (engl. *True RMS voltmeter*).
- ▶ Može se pojaviti **ZNAČAJNA GREŠKA** u merenju signala koji znatno **ODSTUPA** od **SINUSNOG OBLIKA** (ovo uvek treba imati na umu).

# Analitičko određivanje form faktora, k

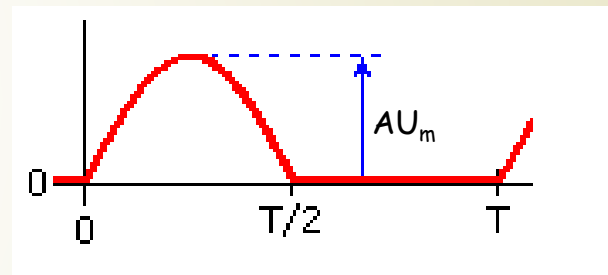
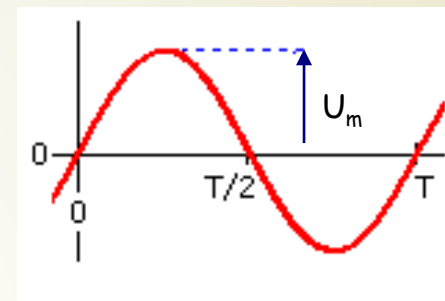
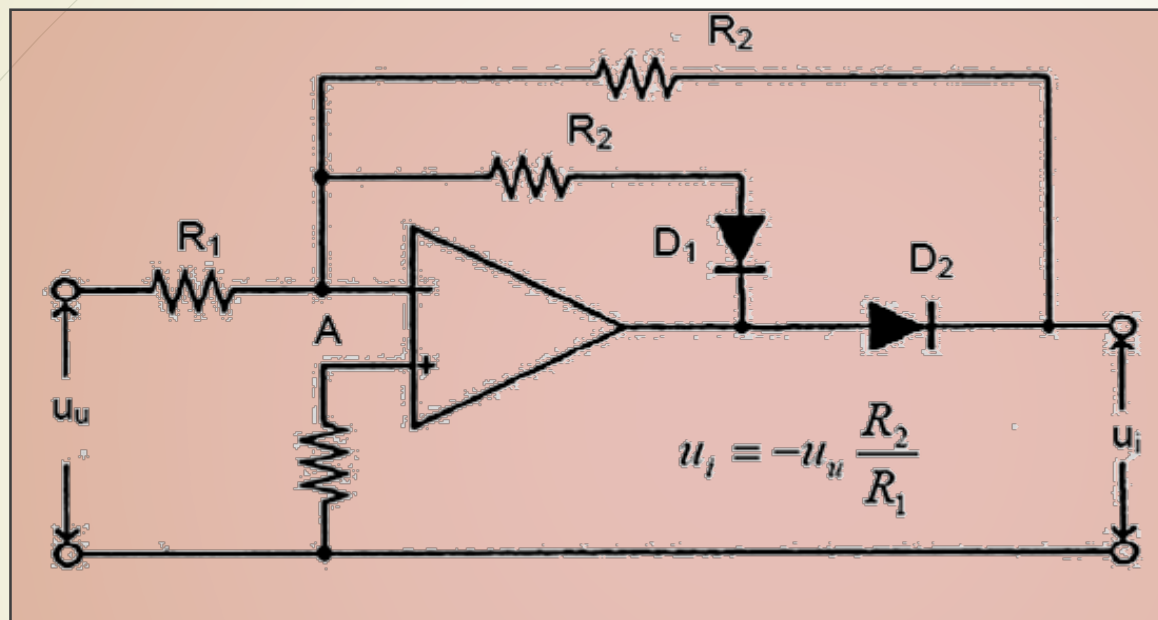


- Evidentna je rezlika u veličini k faktora. Koja je posledica talasnog oblika signala?

# Specifični faktori karakterističnih signala

Talasní oblik	$U_{\text{eff}}$	$U_{\text{sr}}$	k-faktor	c-faktor
 Sinewave	$\frac{V_m}{\sqrt{2}}$ $0.707 V_m$	$\frac{2}{\pi} V_m$ $0.637 V_m$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}}$ 1.111	$\sqrt{2}$ 1.414
 Half wave rectified sinewave	$\frac{V_m}{2}$ $0.5 V_m$	$\frac{1}{\pi} V_m$ $0.318 V_m$	$\frac{2}{\pi}$ 1.571	2 2
 Full wave rectified sine	$\frac{V_m}{\sqrt{2}}$ $0.707 V_m$	$\frac{2}{\pi} V_m$ $0.637 V_m$	$\frac{\pi}{2\sqrt{2}}$ 1.111	$\sqrt{2}$ 1.414
 Triangular wave	$\frac{V_m}{\sqrt{3}}$ $0.577 V_m$	$\frac{V_m}{2}$ $0.5 V_m$	$\frac{2}{\sqrt{3}}$ 1.154	$\sqrt{3}$ 1.732
 Amplitude symmetrical rectangular	$V_m$	$V_m$	1	1
 Saw tooth pulse	$\sqrt{\frac{\eta}{3}} V_m$	$\frac{\eta}{2} V_m$	$\sqrt{\frac{4}{3\eta}}$	$\sqrt{\frac{3}{\eta}}$
 Offset pulse	$V_m \sqrt{\eta(1 - A^2) + A^2}$	$V_m [\eta(1 - A) + A]$	$\frac{\sqrt{\eta(1 - A^2) + A^2}}{\sqrt{[\eta(1 - A) + A]}}$	$\frac{1}{\sqrt{\eta(1 - A^2) + A^2}}$
 Exponential pulse	$\sqrt{\frac{\tau}{2T}} (1 - e^{-2T/\tau})$ $\cong \sqrt{\frac{\tau}{2T}} V_m$	$\frac{\tau}{T} (1 - e^{-T/\tau})$ $\cong \frac{\tau}{T} V_m$	$\sqrt{\frac{T}{2\tau}}$	$\sqrt{\frac{2T}{\tau}}$

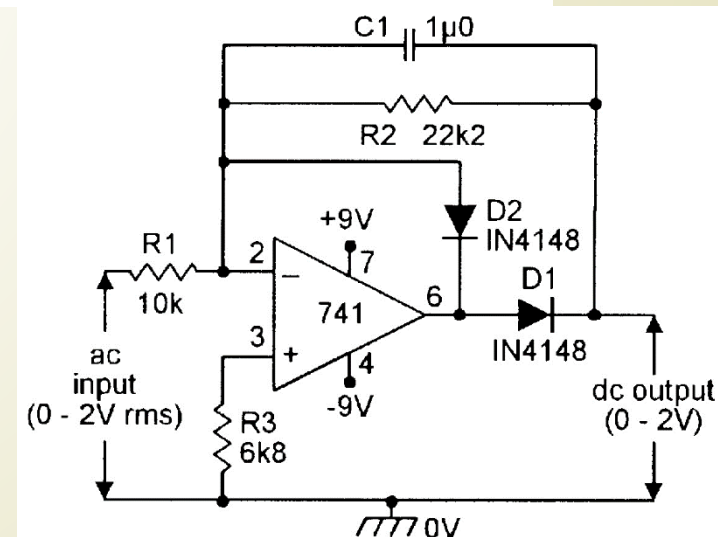
# Ispravljači sa odzivom na srednju vrednost (1)



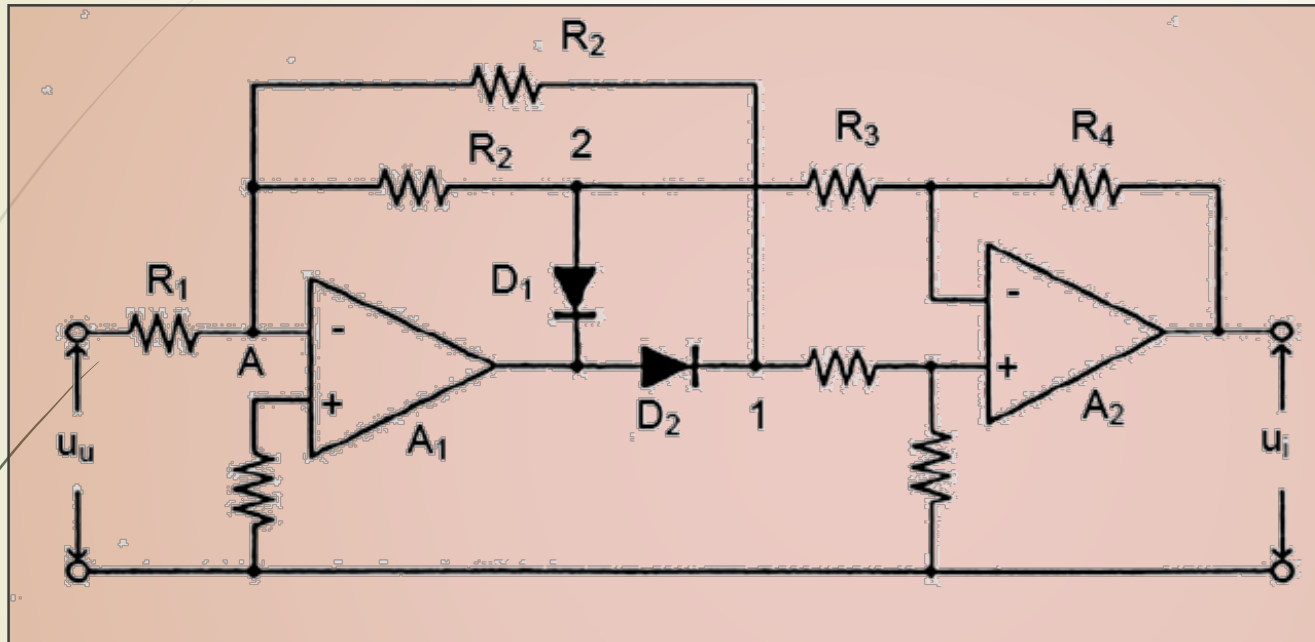
Ispravljač sa odzivom na **SREDNJU VREDNOST** realizovan operacionim pojačavačem

Srednja vrednost izlaznog napona za **JEDNOSTRANI** ispravljač:

$$U_i = AU_{sr} = A \frac{U_m}{\pi}$$



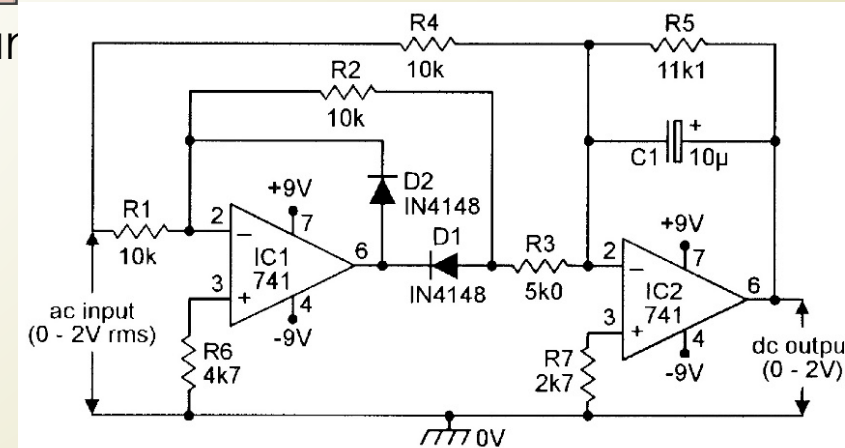
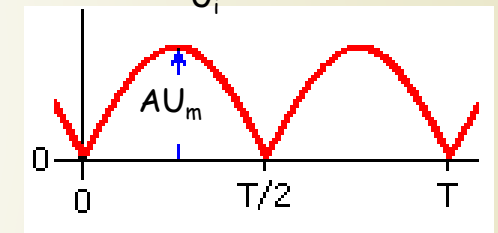
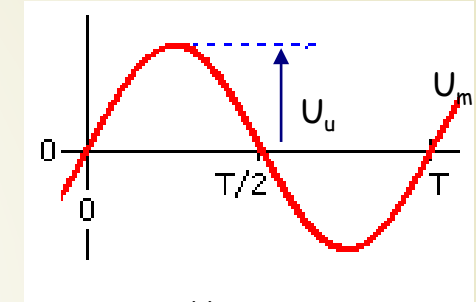
# Ispravljači sa odzivom na srednju vrednost (2)



Ispravljač sa odzivom na SREDNJU VREDNOST realizovan operacionim pojačavačem

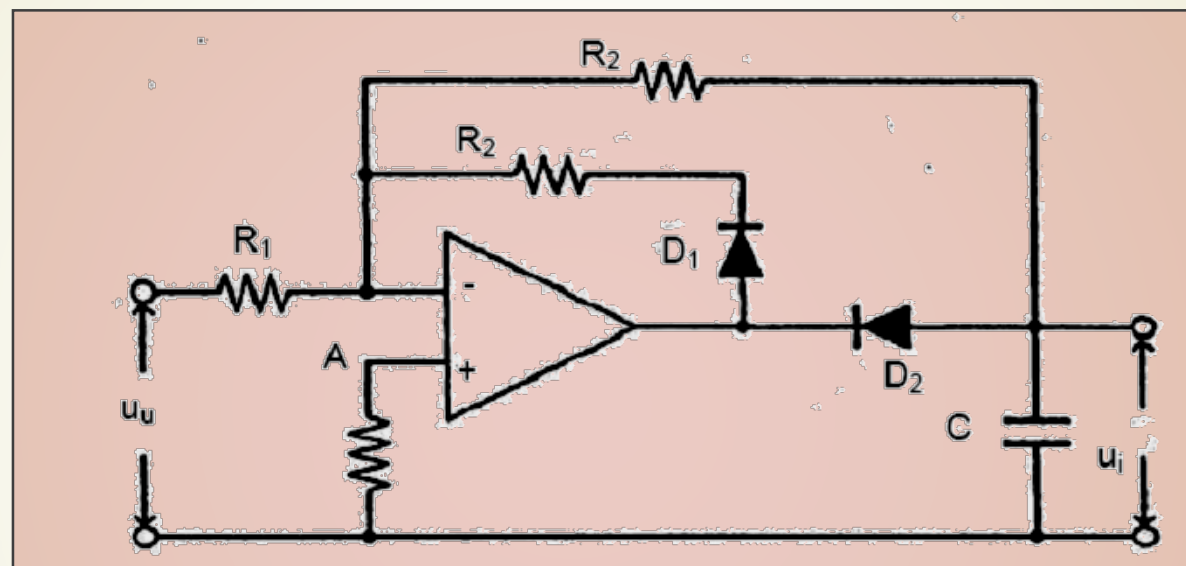
Srednja vrednost izlaznog napona za **DVOSTRANI** ispravljač:

$$U_i = AU_{sr} = A \frac{2U_m}{\pi}$$





# Ispravljači sa odzivom na vršnu vrednost

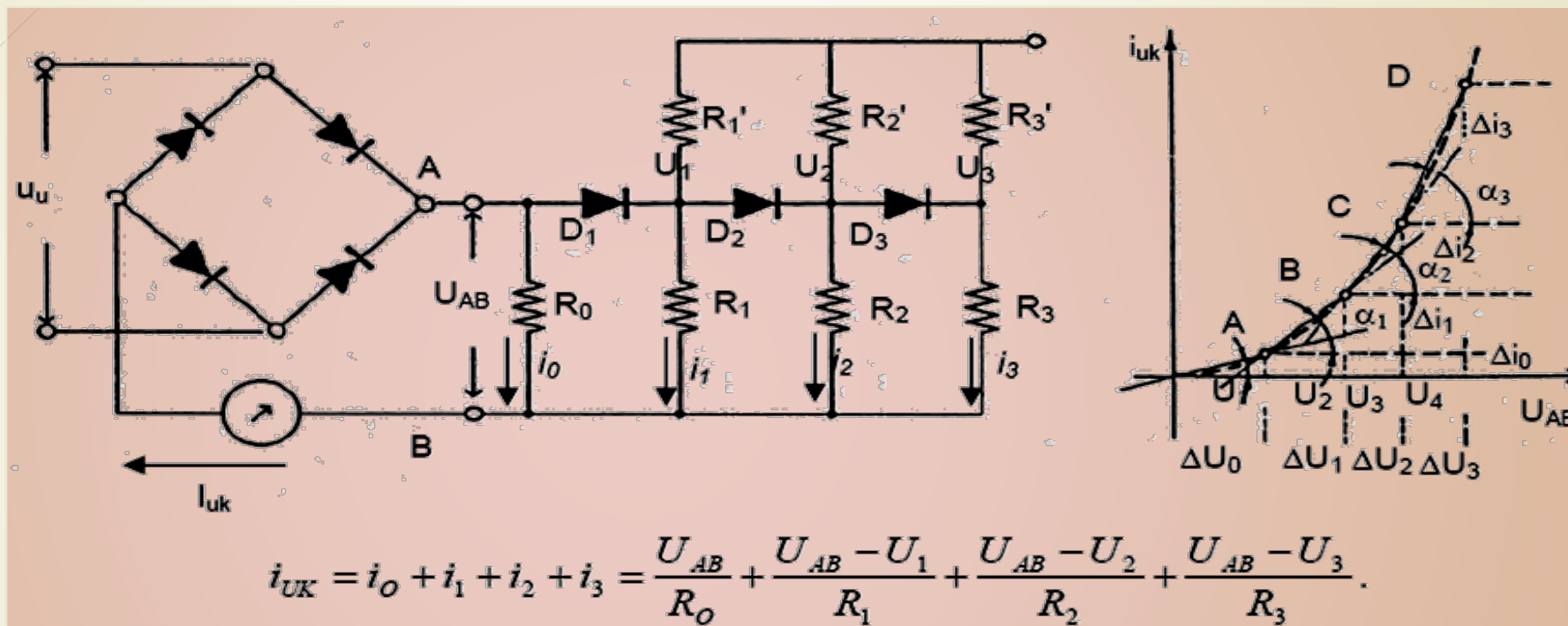


$$U_i = AU_m$$

Ispravljač sa odzivom na **VRŠNU VREDNOST** realizovan operacionim pojačavačem

- Prikazani ispravljač se primenjuje u voltmetrima za merenje napona **VISOKIH FREKVENCIJA**.
- Primenjuju se u **JEFTINIJIM ANALOGNIM VOLTMETRIMA**, čija je greška merenja efektivne vrednosti napona 3% do 5%, a najmanji merni opseg je 0,2 V (zašto?).
- Zbog niske granične frekvencije operacionog pojačavača primena mu je ograničena na **NIŽE FREKVENCije**.

# Voltmetri kvazi-efektivne vrednosti (1)

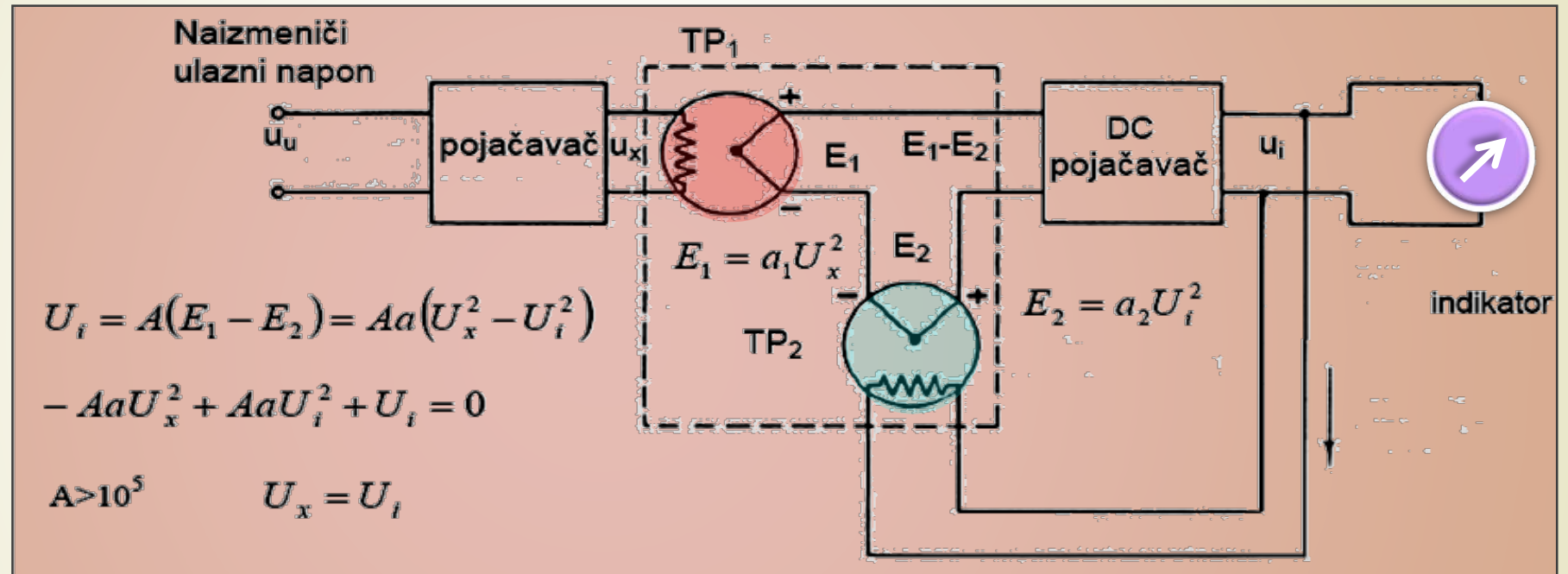


- ▶ U praksi su najzastupljenija rešenja sa **ISPRAVLJAČEM SA ODZIVOM NA SREDNJU** ili **VRŠNU VREDNOST** i dodatnim baždarenjem skale indikatora u **EFEKTIVNIM VREDNOSTIMA**.
- ▶ Odziv na efektivnu vrednost imaće ispravljač čija je **STRUJNO-NAPONSKA KARAKTERISTIKA KVADRATNOG** karaktera:  $i(t)=ku^2(t)$ .

## Voltmetri kvazi-efektivne vrednosti (2)

- ▶ KAKO formirati (sintetizovati) traženu **KVADRATNU U/I KARAKTERISTIKU?**
- ▶ Sinteza kvadratne karakteristike pomoću **NIZA DIODA** naziva se **DIODNI SINTETIZATOR KVADRATNE KARAKTERISTIKE**.
- ▶ Ova električna šema obezbeđuje da se na različitim naponskim nivoima uključuju pojedini **OTPORNICI** čime se **MENJA OTPORNOST** između tačaka **A** i **B** u zavisnosti od jednosmernog napona  $U_{AB}$ .
- ▶ **KVALITET APROKSIMACIJE** direktno zavisi od **BROJA PRIMENJENIH DIODA**.
- ▶ Osnovni nedostatak ovog ispravljača je određena **TEMPERATURNNA OSETLJIVOST**.
- ▶ Njegova primena je **DOSTA ČESTA**, čak i u digitalnim **VOLTMETRIMA NAJVIŠE KLASE**, kada se javlja pod imenom **RAČUNSKI TIP** naizmenično-jednosmernog pretvarača (engl. *Computational* ili *calculating type AC/DC converter*).
- ▶ U stručnoj literaturi ovi voltmetri se nazivaju **VOLTMETRIMA KVAZI EFEKTIVNE VREDNOSTI** (engl. *Quasi RMS responding voltmeter*).

# Analogni V-metar prave efektivne vrednosti

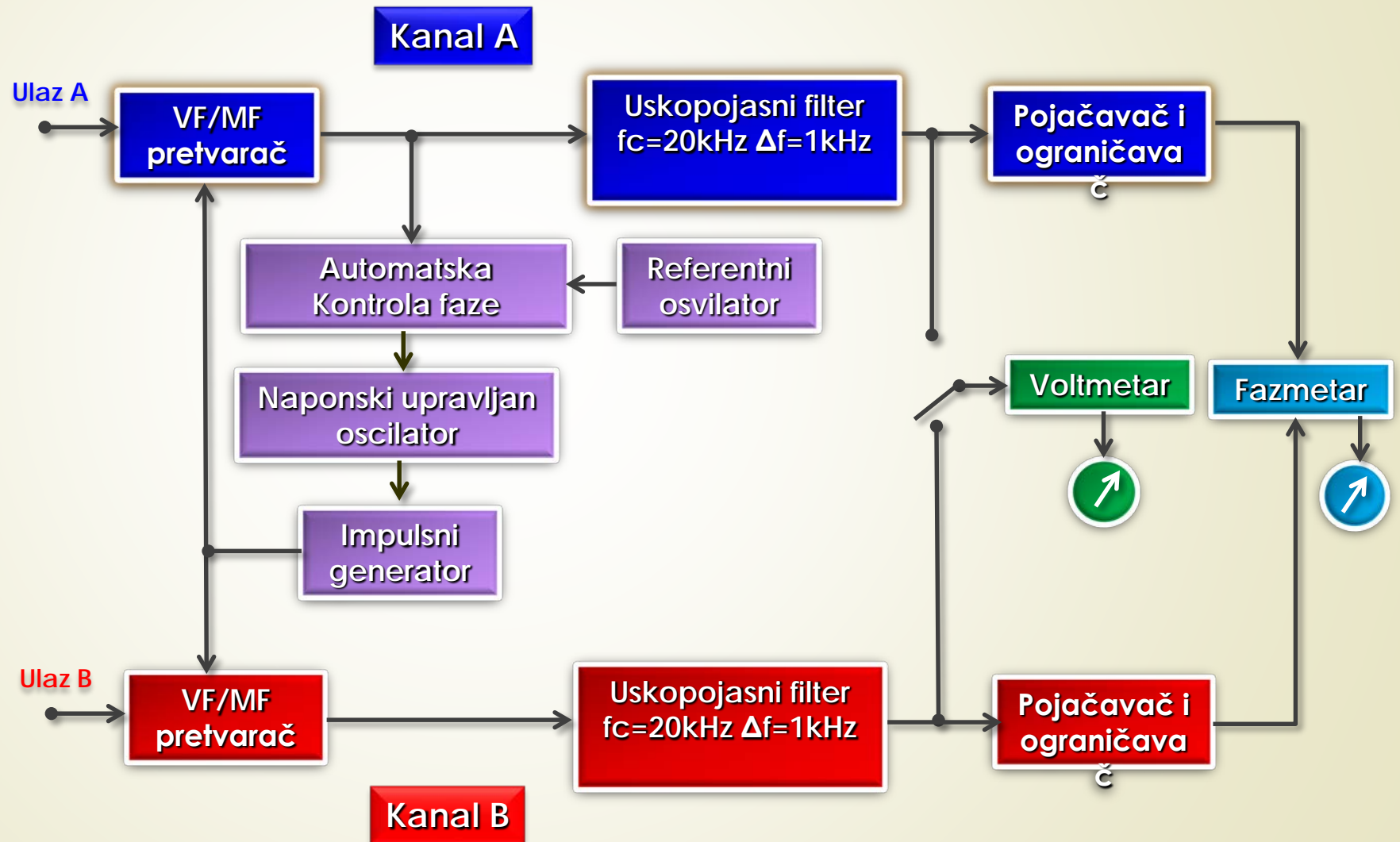


- Problem nelinearnosti termopretvarača se rešava dodavanjem još jednog naponskog termopretvarača koji se smešta u istu mernu-radnu sredinu.
- Nelinearna karakteristika ulaznog mernog termopretvarača TP1 se poništava uravnotežavajućim termopretvaračem TP2 u POVRATNOJ SPREZI.

# Specijalni V-m: Vektorski voltmetar (1)

- **VEKTORSKI VOLTMETAR** pripada familiji modernih i složenih mernih instrumenata koji karakterišu ponašanje **LINEARNOG ELEKTRIČNOG KOLA** (mreže) u **FREKVENCIJSKOM DOMENU**.
- Linearno električno kolo (mreža) se testira **PROIZVOLJNIM SINUSOIDNIM POBUDNIM SIGNALOM** i merenjem tako dobijenih **ODZIVA U FREKVENCIJSKOM OPSEGU** od interesa.
- Vektorski voltmetar meri **AMPLITUDU** i **FAZU** posmatranog signala.
- Za razliku od ostalih analizatora signala koji pored mernog dela poseduju i izvor pobudnih signala, vektor voltmetar je **ČISTO MERNI INSTRUMENT** (dakle **NE POSEDUJE** izvor pobudnih signala).
- **VEKTOR VOLTMETAR** je dvokanalni merni instrument, koji meri **POJEDINAČNE AMPLITUDE** oba priključena VF sinusoidna signala i **FAZNU RAZLIKU** između njih.

# Specijalni V-m: Vektorski voltmetar (2)



# Specijalni V-m: Vektorski voltmetar (3)

- ▶ Osim apsolutnih naponskih merenja, vektor voltmetar se koristi za merenje:
  - ▶ odnosa amplituda dva signala,
  - ▶ unetog slabljenja,
  - ▶ kompleksnih impedansi,
  - ▶ S-parametara tranzistora,
  - ▶ izobličenja u visokofrekvencijskom opsegu,
  - ▶ stepena amplitudne modulacije,
  - ▶ prenosnih funkcija filtera,
  - ▶ parametara dvopola,
- ▶ Amplitudne - i fazno-frekvencijske karakteristike pojačavača...
- ▶ Ulazna impedansa je 50 W ili visokoomska kada se koriste posebne sonde.
- ▶ Merenje fazne razlike obavlja se u opsegu 0 do 360°, sa razlaganjem od 0,1°, a greška merenja 1°- 6°.

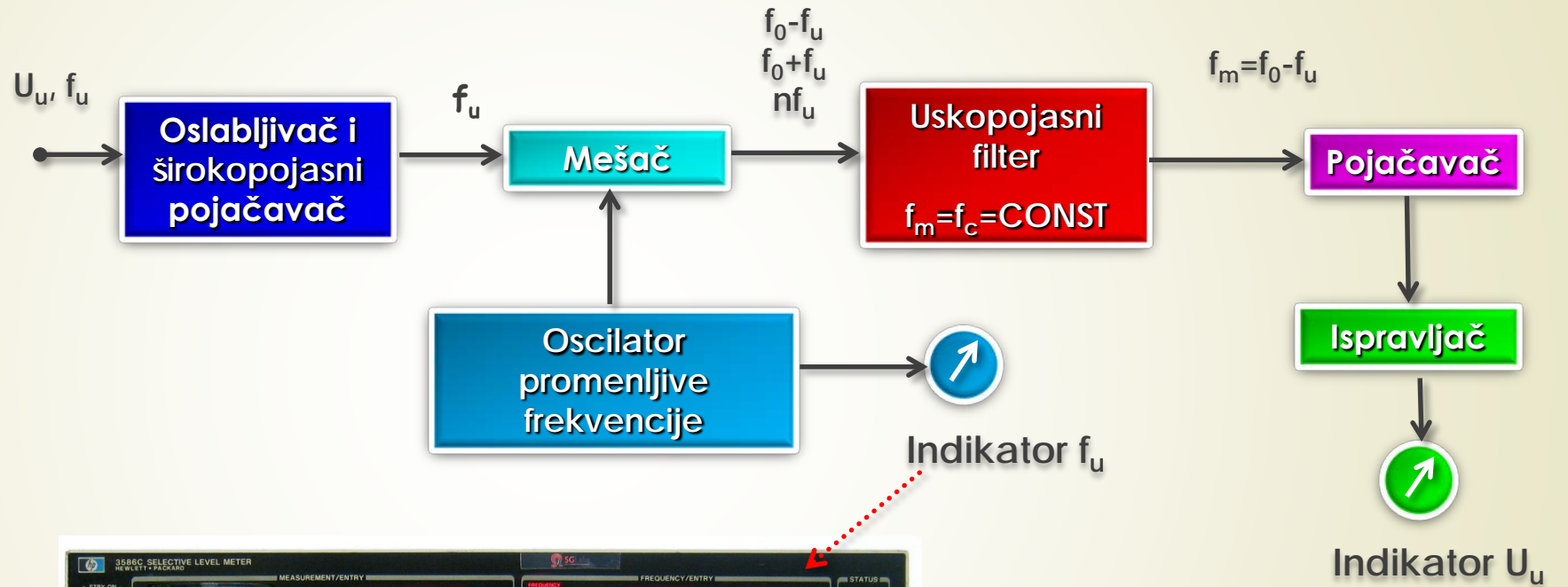


# Specijalni V-m: Selektivni voltmetar (1)

- ▶ Kod **ŠIROKOPOJASNIH** elektronskih voltmetara nije moguće **RAZDVOJITI KORISTAN SIGNAL OD ŠUMA**, kao ni signale različitih frekvencija jedne od drugih.
- ▶ Kod merenja napona u **TELEKOMUNIKACIJAMA** neophodno je **POJAČATI**, odnosno **IZDVOJITI** samo signal **JEDNE ODREĐENE FREKVENCije** i izmeriti njegovu **AMPLITUDU**.
- ▶ Takva merenja je moguće obaviti jedino sa **SELEKTIVNIM VOLTMETROM**.
- ▶ **SELEKTIVNI ELEKTRONSKI VOLTMETAR** je u principu **USKOPOJASNI POJAČAVAČ** koji izdvaja signal samo jedne frekvencije spektra, dok **SVE DRUGE SIGNALNE PRIGUŠUJE**.
- ▶ Na ovom principu rade i svi savremeni **RADIOPRIJEMNICI**.
- ▶ Merni opseg selektivnih voltmetara je od 3 mV do 3 V.
- ▶ Frekvencijski **opseg 50 Hz do 30 MHz** za NF selektivni voltmetar,
- ▶ Od **30 MHz do 1000 MHz** za VF selektivni voltmetar.



# Specijalni V-m: Selektivni voltmetar (2)



## Specijalni V-m: Selektivni voltmetar (3)

- ▶ Selektivni voltmetar meri **STEPEN MODULACIJE** amplitudno modulisanog signala, **FAKTOR IZOBLIČENJA**, kao i **JAČINU ELEKTROMAGNETSKOG POLJA** (uz odgovarajuće antene) u kom se slučaju nazivaju merači polja.
- ▶ Rad ovog voltmetra se zasniva na merenju napona signala unutar željenog **USKOG FREKVENCIJSKOG OPSEGA**.
- ▶ Širina ovog frekvencijskog opsega može iznositi svega **NEKOLIKO HERCA** do **NEKOLIKO KILOHERCA**.
- ▶ Zahvaljujući ovako maloj širini frekvencijskog pojasa, voltmetar ima veoma **MALI NAPON ŠUMA**.
- ▶ Praktično meri korisni signal bez prisustva šuma, što mu omogućuje da meri signale od svega 1 mV uz sasvim **ZADOVOLJAVAJUĆI** odnos signal šum.
- ▶ Ulazna otpornost selektivnog voltmetra se može menjati i najčešće iznosi 50  $\Omega$ , 75  $\Omega$ , 150  $\Omega$ , 600  $\Omega$ , ili je visokoomska (veća od 20 k  $\Omega$ ).
- ▶ Propusni opsezi definisani sa 3 dB su, na primer, 20 Hz, 400 Hz, i 3100 Hz.

# Zadaci

- ▶ Na ulaz V-metra baziranog na ispravljaču sa odzivom na srednju vrednost, doveden je naizmjenični napon sa form faktorom  $k=1.18$ . Kolika je relativna greška pri mernju ovog napona analognim elektronskim voltmetrom?
- ▶ Nacrtati ispravljač sa odzivom na srednju vrednost napona realizovanog sa operacionim pojačavačem i dvostranim ispravljanjem. Ako je pojačanje ovog stepena  $A=10$  dB, kolika je srednja vrednost izlaznog napona  $U_s$  ako se na ulaz ovog ispravljača dovede napon  $u_{ul} = 15\pi \sin(2\pi 100t)$  ?
- ▶ Koliki napon će pokazivati naizmjenični voltmetar sa ispravljačem sa odzivom na srednju vrednost ako se na njegov ulaz dovede jednosmerni napon  $U_{ul} = 4$  V?
- ▶ Izračunati vrednosti optornika u naponskom delitelju elektronskog voltmetra za opsege od 3 V, 12 V, 30 V, 120 V, 300 V i 1200 V. Osnovni merni opseg ovog voltmetra na kome se ima puni otklon skale je  $U_{POS} = 3$  V sa ekvivalentnim otporom  $R_e = 8$  M $\Omega$ .