

mjerenje u riječi i slici



Uređuje: Mirko Klaić, dipl. ing.

DIGITALNI MULTIMETRI I OSCILOSKOPI

Uvod

Tijekom stotinjak godina, sve do sredine prošlog stoljeća, za mjerenje električkih i neelektričkih veličina rabili su se samo analogni elektromehanički instrumenti. Tada su oni dosegli zenit tehnološkog razvoja, a budući da je praksa zahtijevala instrumente s užim granicama pogrešaka, razvijeni su mjerni uređaji na drugom načelu. Kako se kod njih analogna veličina pretvarala u digitalni zapis nazvani su *digitalnima* (na početku samo voltmetri i ampermetri) i mogli su udovoljiti zahtjevu za većom točnošću, pa su počeli potiskivati iz uporabe analogne instrumente.

Prije dvadesetak godina počela se smanjivati, pa je i posve prestala, proizvodnja pojedinih vrsta, pretežito preciznih, elektromehaničkih instrumenata. Danas se na tržištu, osim malog broja tzv. univerzalnih instrumenata, većinom nalaze ugradni elektromehanički instrumenti, i to s *pomičnim svitkom i permanentnim magnetom*, s otklonima kazaljki 90°, 230° ili 270°. Osim za izravno mjerenje napona, struje ili otpora, često se rabe i za mjerenje drugih električkih veličina (npr. snage, $\cos \varphi$ ili frekvencije). U tu svrhu im se pridodaju, ugrađeni ili zasebni, pretvornici električkih veličina u električke, koji na izlazu daju normiranu istosmjernu struju ili napon. Istom vrstom instrumenta mogu se mjeriti i neelektričke veličine, ako se one pomoću prikladnog osjetila (senzora) i pripadnog prilagodnog sklopa pretvore u mjerljivu struju, napon ili otpor. U nekim automobilima se, uz instrumente s pomičnim svitkom, upotrebljavaju i robusniji instrumenti s *pomičnim magnetom* za mjerenje temperature rashladne tekućine ili razine goriva u spremniku.

Čovjekov mozak prilagođen je analognom prikazu. Praktična primjena pokazala je da, u sustavima gdje je potrebno istodobno pratiti pokazivanje triju ili više instrumenata te u skladu s njihovim pokazivanjima obavljati neke radnje (npr. uključivati ili isključivati strujne krugove kod određenih iznosa mjerene veličine), valja rabiti *instrumente s analognim prikaznicima*. Ti prikaznici mogu biti s materijalnom kazaljkom i ljestvicom, kao kod elektromehaničkih instrumenata s neposrednim pokazivanjem, zatim katodna cijev ili pak suvremeniji, npr. s tekućim kristalom (LCD) ili plazmom.

Kvazianalogni ili stupčasti (engl. bar-graph) instrumenti su, u osnovi, elektronički voltmetri koji mjerenu veličinu prikazuju analogno, i to duljinom (visinom) stupca sastavljenom od konačnog niza svjetlećih elemenata u odnosu na ljestvicu (dio prikaznika na slici 1). Pritom se kao prikaznici rabe svjetleće diode, tekući kristali ili plazma. Prikladni su za istovremeno praćenje više mjerenih veličina pa se rabe u elektroakustičkim uređajima, automobilima, za istodobni analogni prikaz u većem broju digitalnih mjerila, u procesnoj industriji i drugdje, a danas se izrađuju i s lučnim ili kružnim ljestvicama.

S druge strane, *digitalni uređaji* donijeli su niz prednosti u odnosu na analogne instrumente (uz, dakako, određene nedostatke), a njihov tehnološki razvoj traje i dalje, pa danas postoje uređaji različitih namjena i velikih mogućnosti. U okviru ovog teksta ograničit ćemo se na digitalne multimetre i osciloskope, kao mjerne uređaje (mjerila) opće namjene.

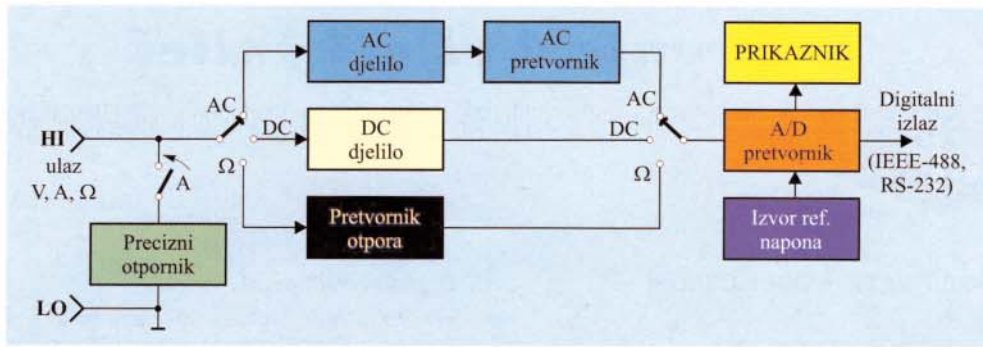
Digitalni multimetri

Pri istosmjerni digitalni voltmetri pojavili su se početkom pedesetih godina prošlog stoljeća, a imali su velik broj glomaznih elektromehaničkih dijelova (npr. birače korak po korak iz tadašnjih telefonskih centrala) pa je masa pojedinih izvedbi dosezala i do 30 kg. Prikaznici su im bili sa 4 znamenke, a granice pogrešaka $\pm 0,01\%$ od mjernog dometa. Tijekom narednih deset godina elektromehanički dijelovi postupno su zamjenjivani elektroničkim sklopovima pa su sredinom šezdesetih digitalni voltmetri te multimetri (*digital multimeter* – skraćeno DMM), tj. mjerila koja mjere napon, struju i otpor, imali samo elektroničke sklopove.

Suvremena digitalna mjerila, koja se dijele na prenosiva (*hand-held*), stolna (*bench*) ili ugradna (*system*), mogu prikazivati od $3\frac{1}{2}$ do $8\frac{1}{2}$ znamenaka. Znak $\frac{1}{2}$ ukazuje na proširen prikaz mjerene veličine pa tako mjerilo s $3\frac{1}{2}$ znamenke može pokazati brojeve unutar ± 1999 (umjesto ± 999 za 3 znamenke); kod nekih to znači ± 2999 , a u novije vrijeme pojavila su se mjerila koja pokazuju čak do ± 3999 . Kod nekih izvedbi umjesto ovih oznaka navodi se najveće pokazivanje, npr. 40000. Vrhunski DMM-i pokazuju $8\frac{1}{2}$ znamenaka, a razlučivost im je 10 nV na mjernom opsegu 1 V. Za razliku od analognih instrumenata, kod kojih su normirani razredi točnosti, kod digitalnih multimetara se *granice pogrešaka* redovito iskazuju u obliku $\pm(a \cdot \text{očitavanje} + b)$, gdje je a relativan iznos, a b je doprinos u apsolutnom iznosu koji se iskazuje ili kao određeni napon, ili se računa u odnosu na postavljeni mjerni opseg; tako može biti zadano npr. $\pm(7 \cdot 10^{-5} \cdot \text{očitavanje} + 2 \cdot 10^{-5} \cdot \text{mjerni opseg})$. Kod najboljih multimetara granice pogrešaka mogu biti čak i reda veličine $\pm 10^{-6}$, s tim da se one razlikuju za svaki mjerni opseg i za svako mjerno područje (istosmjerni ili izmjenični napon, istosmjerna ili izmjenična struja, otpor). Ako drukčije nije navedeno, granice pogrešaka su naznačene za temperaturno područje $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$, uz nazivni napon napajanja i propisano vrijeme nakon njegova uključivanja. U načelu vrijede za određeno vremensko razdoblje (24 h, 90 dana, 180 dana, itd.) od dana umjeravanja. Točnosti mjerenja izmjeničnih napona i struja, često frekvencijski ovisne, manje su za jedan ili više redova veličine od onih pri mjerenju istosmjernih napona i struja. Točnost mjerenja otpora može biti istog reda veličine kao i mjerenje istosmjernog napona, ali je često manja.

Digitalni multimetri *odlikuju se*: velikim ulaznim otporom (redovito 10 M Ω , pa čak i >10 G Ω), užim granicama pogrešaka, bržim odzivom (do reda veličine 10^{-5} s), bržim očitanjem zbog brojčanog prikaza, širim frekvencijskim opsegom (f_g od 1 kHz pa do više MHz), mjerenjem razine kratkotrajnih impulsa (npr. prenapona), većim kutom gledanja (do $\pm 75^\circ$, analogni 0°), očitanjem u nepovoljnim svjetlosnim uvjetima, automatskim biranjem mjernih opsega, pamćenjem najveće i najmanje izmjerene vrijednosti ili njihovog određenog broja, boljim iskorištenjem površine prednje ploče za davanje informacija, itd. Pojedini DMM-i imaju još neke dodatne mogućnosti, a neki pak, posebice najjednostavniji, nemaju neke od navedenih.

Međutim, pri uporabi digitalnih mjerila može doći do subjektivnih pogrešaka, npr. zabuna u očitavanju broja ništica ili zamjene i krivog očitavanja brojeva 3, 5, 6 i 8. Nadalje, bolji DMM-i se napajaju iz mreže pa su osjetljiviji na različite smetnje mrežne frekvencije.



Sl. 1. Pojednostavljena blok-shema digitalnog multimetra

Blok shema digitalnog multimetra

Rad DMM-a se zasniva na *mjerenju istosmjernog napona*, a druge veličine (struja, otpor ili izmjenične veličine) mjere se tako da se na prikladan način pretvore u razmjernan istosmjerni napon. Na slici 1 prikazana je pojednostavljena blok-shema takvog mjerila. Djelilo za izmjenični napon frekvencijski je kompenzirano tako da je dijeljenje napona, zbog parazitnih kapaciteta, neovisno o frekvenciji. Struja se mjeri preko pada napona kojeg ona prouzroči na preciznom otporniku (shuntu) poznatog iznosa ugrađenom u mjerilo, a otpor se priključenog otpornika mjeri kao pad napona kojeg na njemu prouzroči struja (poznate vrijednosti) iz strujnog izvora u samom mjerilu (pretvornik otpora). Osim spomenutih veličina, suvremeni DMM-i mogu mjeriti i neke druge veličine (npr. kapacitet ili frekvenciju), a priključkom prikladnog osjetila i temperaturu. Uz to, oni bolji imaju još nešto, poput matematičke obrade izmjenjenih vrijednosti, filtriranja signala ili pak mogućnost povezivanja s osobnim računalom.

Najvažniji dio DMM-a je *analogno-digitalni (A/D) pretvornik*, koji analognu *istosmjernu veličinu* pretvara u digitalni zapis. Digitalna veličina je binarna s određenim brojem bitova (npr. 8-bitovni zapis izgleda kao 10011011); krajnje lijevi bit naziva se najznačajnijim (MSB – *most significant bit*), a krajnje desni najmanje značajnim (LSB – *least significant bit*). Dekoderom se binarni broj pretvara u dekadski radi prikaza. Tijekom prošlih 50 godina bilo je u uporabi više vrsta A/D pretvornika, a u današnjim se DMM-ima najčešće rabe *pretvornici s integratorom* (s dvostrukim pilastim naponom – *dual-slope*) i sa *sljednim približenjem* (sukcesivnom aproksimacijom). U digitalnim osciloskopima upotrebljavaju se *paralelni (flash) A/D pretvornici* s velikom brzinom pretvorbe.

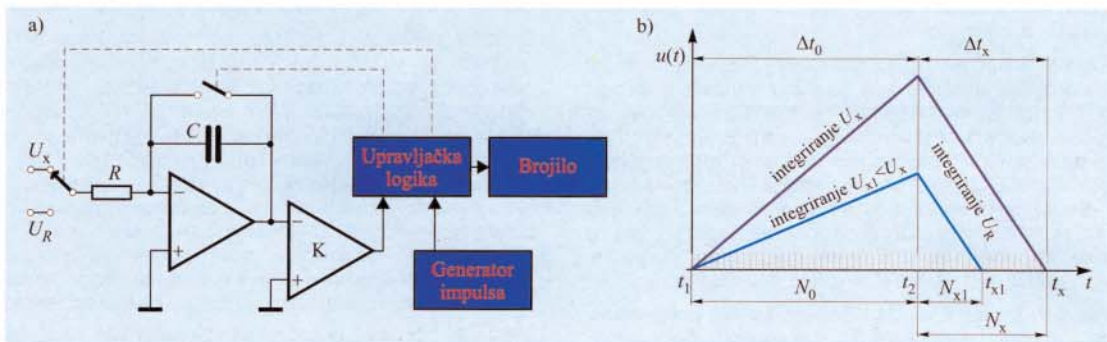
Pretvornik s integratorom za DMM

Kod pretvornika s integratorom (slika 2) tijekom točno određenog vremenskog intervala $\Delta t_0 = t_2 - t_1$ *integrira se mjereni napon* U_x . Nakon toga upravljački sklop spaja na ulaz integratora poznati istosmjerni napon U_R iz referentnog izvora ugrađenog u mjerilo, ali sa suprotnim predznakom od U_x , pa integracija traje tijekom intervala $\Delta t_x = t_x - t_2$ dok se ne dosegne ništa, što se ustanovljuje komparatorom. Za vrijeme Δt_0 i Δt_x brojilo izbroji pripadan broj N_0 i N_x impulsa (iz generatora impulsa frekvencije f). Broj impulsa N_0 je neovisan o iznosu napona U_x , dok je N_x njemu razmjernan, pa odavde slijedi da je izmjereni napon $U_{ss} = U_R N_x / N_0$. Budući da se mjereni napon integrira tijekom Δt_0 , izmjerena vrijednost U_{ss} bit će jednaka *srednjoj vrijednosti mjenjenog napona* tijekom tog intervala. Zbog toga se Δt_0 odabire tako da bude jednako periodi mrežnog napona ili njezinu višekratniku (tipično je $\Delta t_0 = 100$ ms), kako bi se potisnula smetnja mrežne frekvencije.

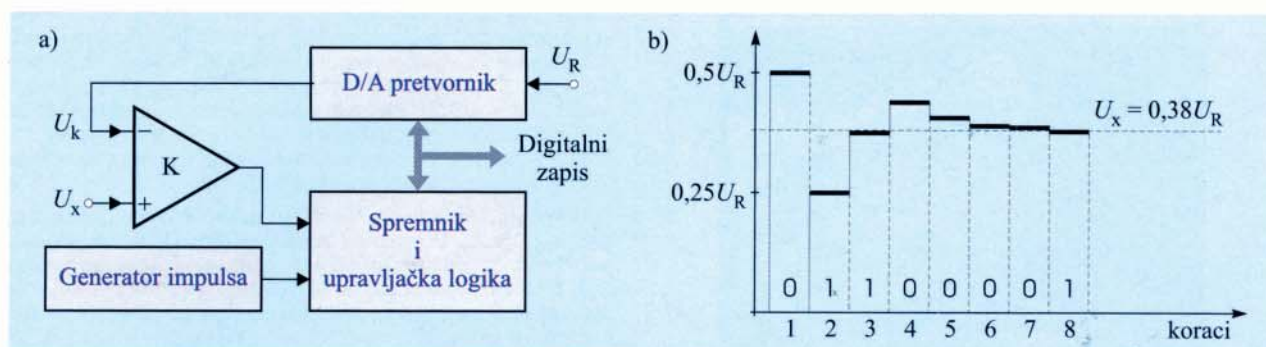
Kod nekih DMM-a može se birati razlučivost (tj. broj prikazanih znamenaka od npr. $4\frac{1}{2}$ do $6\frac{1}{2}$), a time i vrijeme integracije. Manji broj znamenaka znači manju točnost i manju razlučivost, ali i brži odziv (veći broj mjerenja u sekundi); tako se npr. s $4\frac{1}{2}$ znamenke postiže 1000 očitavanja u sekundi, s $5\frac{1}{2}$ znamenaka njih 300, a sa $6\frac{1}{2}$ znamenaka samo 6. Prije dvadesetak godina pojavili su se DMM-i s pretvornicima ovog tipa kod kojih se razlikuju otpori R za integriranje U_x i U_R pa se time povećala brzina pretvorbe. Danas se najveća točnost postiže pretvornikom s višestrukim pilastim naponom (*multislope*).

Pretvornik sa sljednim približenjem za DMM

Kod ovog se pretvornika (slika 3) referentni istosmjerni napon U_R digitalno-analognim (D/A) pretvornikom pretvara u binarno



Sl. 2. Analogno-digitalni integrirajući pretvornik s dvostrukim pilastim naponom: a) pojednostavljena blok-shema; b) vremenski dijagram napona na izlazu integratora za dva mjerena napona različitih vrijednosti



Sl. 3. Analogno-digitalni pretvornik sa slijednim približenjem: a) pojednostavljena blok-shema; b) grafički prikaz primjera pretvorbe 8-bitnim pretvornikom za $U_x = 0,38 U_R$

stupnjevani napon U_k (iznosa $U_R/2, U_R/4, U_R/8$, itd.), koji se komparatorom uspoređuje s trenutnom vrijednošću mjenog napona U_x , koja se pohranjuje sklopom za uzorkovanje i pridržavanje (sample&hold). Svaki mjerni ciklus počinje usporedbom U_x i $U_R/2$ (tj. prvo se određuje MSB), a potom vrijednost svih bitova manje težine sve do LSB-a. Na izlazu tog pretvornika dobivamo binarni broj s određenim brojem bitova.

Postupak pretvorbe možemo si predočiti vaganjem tereta, čija najveća masa može biti m , s pomoću dvokrake vage; pritom rabimo binarno stupnjevanje utege masa $m/2, m/4, m/8, m/16, m/32$, itd. Na jednu pliticu vage stavimo mjereni teret mase m_x , a na drugu utege. Vaganje počinjemo s utegom mase $m/2$ i ako je njegova masa veća od m_x , uklanjamo ga (i tom binarnom mjestu pridružujemo 0) i stavljamo sljedeći manji. Ako je sad njegova masa manja od m_x , ostavljamo ga (tom binarnom mjestu pridružujemo 1) i pridodajemo sljedeći manji. Ukoliko je zbroj masa tih dvaju utega veći od m_x , uklanjamo ovaj potonji (pridružujemo 0) i stavljamo naredni manji. Taj se postupak ponavlja dok za usporedbu ne upotrijebimo uteg najmanje mase (čemu odgovara LSB), a rezultat vaganja iskazujemo binarnim brojem. Ako smo npr. pri vaganju uporabili 8 utega, dobit ćemo 8-bitovni binarni broj, a razlučivanje će biti $m/2^8$ (uz $m = 1$ kg to znači razlučivanje od 4 g, odnosno analognu za napon od 1 V to je 4 mV).

Pretvornici ovog tipa su brži od pretvornika s integratorom, jer im je red veličine trajanja pretvorbe 10 μ s, ali i manje točni te osjetljiviji na smetnje jer mjere trenutne vrijednosti napona.

Mjerenje izmjeničnih veličina

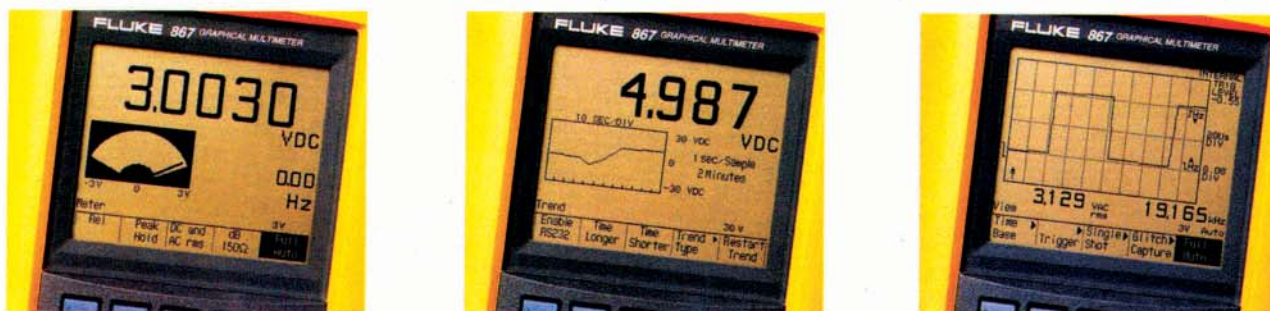
Jednostavan i često upotrebljavan način mjerenja izmjeničnih veličina jest njihovo ispravljanje, npr. pomoću dioda, a izmjerena vrijednost u tom je slučaju jednaka srednjoj vrijednosti. To je posve isto načelo koje se redovito primjenjuje kod analog-

nih univerzalnih instrumenata. Kako nam je u praksi važna efektivna, a ne srednja vrijednost izmjenične veličine, u tom se slučaju ljestvice analognih, ili pokazivanja digitalnih mjerila, umjeravaju u efektivnim vrijednostima sinusne veličine. Stoga pri mjerenju nesinusnih veličina nastaju pogreške razmjerne razlikama činitelja (faktora) oblika (to je omjer efektivne i srednje vrijednosti) sinusne (ξ_0) i mjerene veličine (ξ). Ta pogreška može biti i znatna, pa ako npr. mjerimo napon pravokutna valna oblika čiji je $\xi = 1$, uz $\xi_0 = 1,11$ pripadna će postotna pogreška biti $p \% = \xi^{-1} (\xi_0 - \xi) \cdot 100 \% = 11,1 \%$.

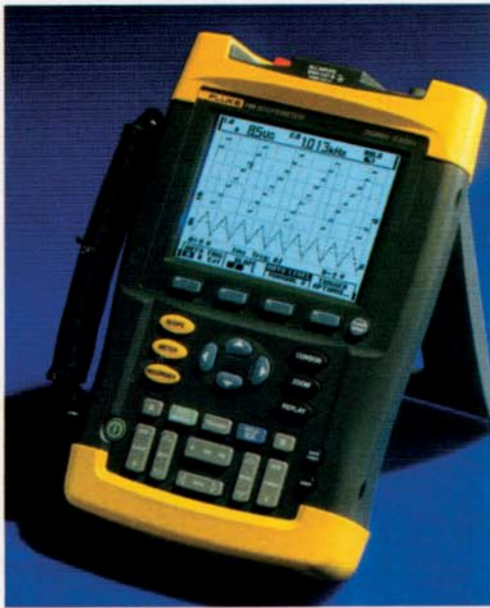
U boljim DMM-ima, pomoću posebnih sklopova i metoda (termopretvornikom, sklopom koji prema definiciji određuje efektivnu vrijednost ili uzorkovanjem) postiže se odziv na efektivnu vrijednost, koja se u pravilu, unatoč tomu što postoji samo jedna efektivna vrijednost, naziva »prava« (TRMS – true root mean square), uz uže granice pogrešaka i širi frekvencijski opseg. Tim se mjerilima mogu mjeriti efektivne vrijednosti nesinusnih veličina s tjemnim činiteljem (to je omjer tjemene i efektivne vrijednosti) 3 pa i većim, bez dodatnih pogrešaka kao kod odziva na srednju vrijednost.

Neke suvremene izvedbe digitalnih multimetara

U novije se vrijeme proizvode posebne vrste DMM-a, tzv. grafički multimetri (graphical multimeters), čija je masa s baterijama oko 1 kg (slika 4), a granice pogrešaka oko 0,5 %. Oni su naročito prikladni za pogonska i terenska mjerenja. Njima se, osim brojčane vrijednosti, može prikazati i valni oblik mjerene veličine do frekvencije 1 MHz, iznos frekvencije te mjeriti i neki drugi parametri (npr. širina impulsa) ili pohranjivati, u određenim vremenskim razmacima, izmjerene vrijednosti tijekom 24 h. Imaju prikaznik dvostruko veći od onih kod običnih DMM-a te veličine, tako da se više parametara mjenog signala, kao i njegov valni oblik, mogu čitko istodobno prikazati.



Sl. 4. Izgled prikaznika suvremenog grafičkog multimetra (graphical multimeter) kod različitih vrsta prikaza



Sl. 5. Suvremeno višenamjensko digitalno mjerilo (scopemeter) koje može raditi kao digitalni osciloskop, multimetar ili zapisno mjerilo

Daljnji korak predstavljaju mjerila koja su kombinacija osciloskopa, multimetra i zapisnog mjerila (scopemeters, slika 5), tako da se izborom jedne od ove tri funkcije u svakom trenutku mogu dobiti informacije o mjenom signalu, bilo da su to mogućnosti vizualnog prikaza kao kod osciloskopa, točnosti izmjerenih vrijednosti kao kod multimetara ili pak njihovo memoriranje za kasniju analizu.

Suvremeni digitalni uređaji, pa tako i multimetri i osciloskopi, mogu se povezati u mjerni sustav upravljan računalom, bilo preko paralelnog sučelja (npr. IEEE-488, tj. GPIB – General Purpose Interface Bus) ili preko serijskog sučelja (npr. RS-232 ili novijeg RS-485). Pri tome samostojni uređaji, fizički odijeljeni od računala, čine s njim logičku i programsku cjelinu, odnosno jedan sustav. Upravljanje pomoću računala omogućuje onda prijenos, prihvatanje, analizu, prikaz i pohranjivanje podataka, komunikaciju s nekim drugim računalom te razvoj automatiziranih mjernih metoda.

U najnovije izvedbe mogu se uvrstiti i tzv. prividna mjerila (virtual instruments). To su DMM-i (a mogu biti i osciloskopi) izrađeni u obliku kartice koja se ugrađuje u osobno računalo (PC), ili u obliku modula koji se spaja na njegov paralelni pristupni sklop (port). Oni nemaju prikaznike, preklopneke niti tipke za upravljanje, nego se prednja ploča uređaja prikazuje na zaslonu računala, a upravljanje se obavlja tipkovnicom, mišem ili dodiranjem zaslona, što omogućuje posebna programska potpora (software).

Digitalni osciloskopi

Općenito se osciloskopi dijele na analogne i digitalne. Dok se analogni osciloskopi nalaze na tržištu već više desetaka godina, 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) budući da je nakon A/D pretvorbe raspoloživ u obliku digitalnog zapisa. Danas kod digitalnih osciloskopa razlikujemo tzv. DSO (Digital Storage Oscilloscope), DPO (Digital Phosphor Oscilloscope) i

SO (Sampling Oscilloscope), koji se razlikuju u pogledu načina uzorkovanja signala, njegove obrade i/ili prikaza. No, zajednička je odlika današnjih digitalnih osciloskopa da su njihove različite konstrukcije, svojstva, način prikaza te dodatne funkcije i mogućnosti prilagođeni točno određenom segmentu u širokoj lepezi njihove primjene (npr. području telekomunikacija, VF tehnike, razvoju digitalnih sustava i slično).

Osnovno načelo rada digitalnih osciloskopa promotrit ćemo na primjeru DSO-a. U njima se serijskim ustrojem za obradu signala (slika 6) promatrani signal 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 pa u potpunosti gubimo informaciju o njegovim mogućim promjenama tijekom tog intervala. To je svakako nedostatak digitalnih osciloskopa, a drugi je to što između trenutaka uzorkovanja i prikaza signala postoji određeno kašnjenje pa prikaz nije u stvarnom vremenu (za razliku od analognih osciloskopa). No, s druge strane, u digitalnim osciloskopima primjenjuju se mikroprocesori, pa je omogućeno dobivanje i niza podataka o mjenom signalu (npr. tjemena, efektivna i srednja vrijednost, trajanje periode, frekvencija, najveći i najmanji iznos), zatim obavljanje matematičkih operacija te posebne analize u vremenskoj i frekvencijskoj domeni.

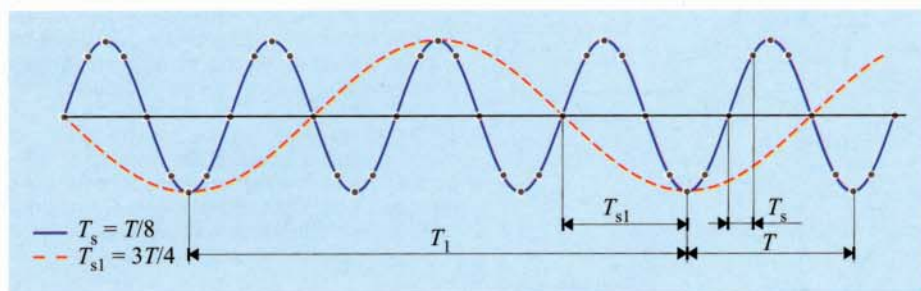


Sl. 6. Vrlo pojednostavljena blok-shema klasičnog digitalnog osciloskopa (DSO)

Ovdje valja naglasiti da je kod digitalnih osciloskopa moguće izabrati nekoliko različitih načina slaganja prikaza na zaslonu prema uzetim uzorcima. Najjednostavniji je način slijednog prikaza (sample mode, slično prikazu kod analognih osciloskopa) kod kojeg se prikazuje uzorkovani valni oblik signala pa vremenski razmak između uzetih uzoraka (sample interval) odgovara vremenskom intervalu točaka prikaza (waveform interval). No, postoje i drugi načini (peak detect mode, envelope mode, average mode) kod kojih to nije slučaj, ali zato omogućuju drukčije analize prikupljenih uzoraka.

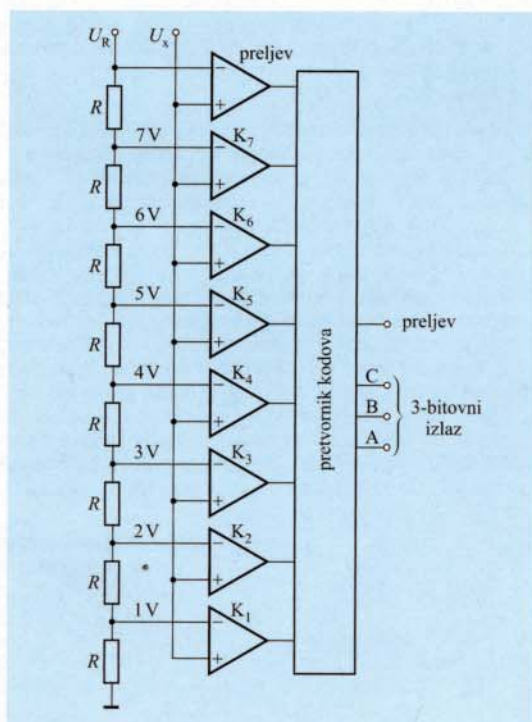
Uzorkovanje signala

Osnovni način uzorkovanja signala (tj. uzimanja uzoraka) jest u stvarnom vremenu (real-time sampling), što je prikazano slikom 7. Sklop za uzorkovanje radi tako da se, nakon okidnog signala, uzorci prikupljaju točnim redoslijedom nakon istih vremenskih intervala, upravo onako kako se pojavljuju na prikazniku. Ovaj način uzorkovanja prikladan je i za periodičke i za neperiodičke signale. Prema Nyquistovom kriteriju, da bi signal bio ispravno rekonstruiran nakon uzorkovanja, učestalost uzorkovanja mora biti najmanje dvostruko veća od frekvencije njegovog najvišeg harmonika. To je nužan uvjet, no za praktičnu primjenu potrebno je barem četiri uzorka po periodu signala, a poželjno je barem deset. Ukoliko je učestalost uzorkovanja premala, nastaje pogreška (slika 7) koja se očituje u tome da je frekvencija rekonstruiranog signala niža od stvarne (tzv. aliasing ili privid) pa neki osciloskopi imaju posebne sklopove pomoću kojih se ona sprječava. Zbog toga je ključan parametar digitalnog osciloskopa njegova brzina (učestalost) uzorkovanja, koja se iskazuje brojem uzoraka u sekundi (samples in second ili S/s), a za DSO iznose do $10 \cdot 10^9$ uzo-



Sl. 7. Uzorkovanje signala (periode T , označenog punom linijom) u stvarnom vremenu: kod vremena uzorkovanja T_s nakon rekonstrukcije dobiva se originalni signal, a kod T_{s1} signal (označen crtkanom linijom) s periodom T_1 (tj. nastaje pogreška zbog tzv. aliasinga)

raka u sekundi (ili skraćeno 10 GS/s). No, najvećom mogućom brzinom uzorkovanja osciloskop radi kod određenog trajanja vremenske baze, a ne uvijek. Naime, budući da su prikaznici današnjih digitalnih osciloskopa s tzv. rasterom, kod kojeg je tipičan broj horizontalnih podjela 512, to znači da se kod svakog prikaza radi s istim brojem točaka u horizontalnom smjeru pa se promjena vremenske baze postiže promjenom brzine uzorkovanja (npr. uz približno 50 uzoraka/DIV – gdje je DIV oznaka za podjelu na pravokutnoj mreži prikaznika – i za odabrano trajanje vremenske baze od 1 ms/DIV, razmak između uzoraka je 20 μ s, a brzina uzorkovanja jednaka 1/20 μ s = 50 kS/s). Budući da se uzorkovanjem dobivaju samo točke promatranog signala, pri njihovoj obradi rabi se interpolacija (linearna ili funkcijom $\sin x/x$) kojom se nadomještaju dijelovi signala izgubljeni pri uzorkovanju. Ovdje izrečene postavke vrijede za osnovne načine slaganja prikaza na zaslonu (npr. *sample mode*), ali postoje i oni kod kojih to nije tako (npr. *peak detect mode*).



Sl. 8. Načelna shema paralelnog (flash) analogno-digitalnog pretvornika

Paralelni A/D pretvornik

Za razliku od DMM-a, kod kojih se u prvom redu traži točnost, a tek onda brzina konverzije, pa rade s razlučivanjem većim čak i od 20 bitova, kod digitalnih osciloskopa je situacija upravo obratna: *prvo je naglasak na brzini, a tek onda na točnosti*, pa se najčešće rabi *razlučivanje od 8 bitova* (kod kojeg je pogreška jednaka $1/2^8 = 0,004$ ili 0,4 %). Zbog toga se ovdje rabi najbrži tip A/D pretvornika, tzv. paralelni pretvornik (*flash*), koji je prikazan

na slici 8. Sastoji se od niza serijski povezanih otpornika jednakih vrijednosti otpora kojima se referentni napon U_R dijeli na jednake padove napona, a paralelno svakom od njih spojen je komparator. Za razlučivanje od n bitova potrebno je $2^n - 1$ komparatora, a najčešće se dodaje još jedan za registraciju preljeva (*overflow*), tako da je npr. za 8-bitovni zapis potrebno 256 komparatora. Mjereni napon U_x dovodi se na drugi ulaz svih komparatora pa se na izlazu onih komparatora, kod kojih je U_x viši od pripadnog potencijala druge ulazne priključnice, dobiva »1«, a na ostalima slijedi »0« (npr. za prikazani 3-bitovni pretvornik te za $U_x = 5,5$ V izlazi komparatora K_1, K_2, K_3, K_4 i K_5 bit će u »1«, a K_6 i K_7 u »0«). Izlazi komparatora spojeni su na pretvornik kodova na čijem se izlazu dobiva binarni broj, a trajanje pretvorbe je reda nekoliko nanosekundi.

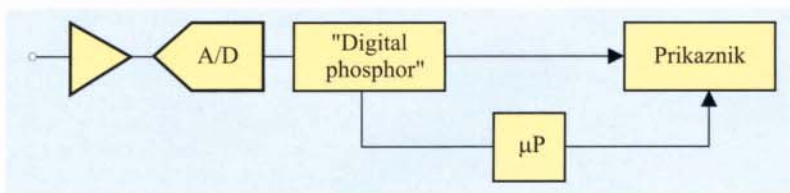
Usporedba različitih tipova digitalnih osciloskopa

DSO su prikladni za niskofrekvencijske i brze impulsne signale te za istodobno promatranje više, obično 4, signala (slika 9). Kod nekih osciloskopa mogu se dobiveni podaci pohraniti i na disketu (ili na neki drugi medij). Osnovni podaci za DSO su: frekvencijski opseg (npr. 1 GHz), brzina uzorkovanja (do 10 GS/s) te duljina zapisa (*record length*) po kanalu (npr. do 120 000 točaka).



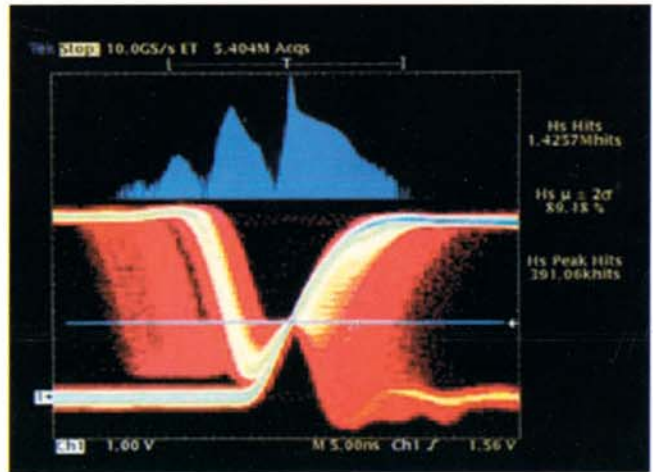
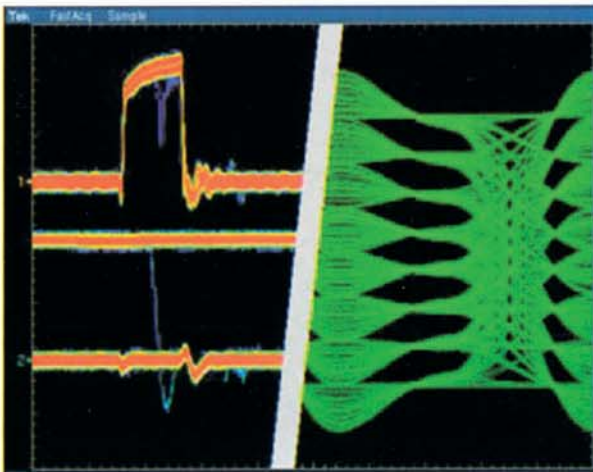
Sl. 9. Izgled DSO osciloskopa

DPO se pojavio prije nekoliko godina i od DSO-a se razlikuje po *paralelnom ustroju* za obradu signala (slika 10). Nakon digitalizacije A/D pretvornikom uzorci se pretvaraju (rasteriziraju) u trodimenzionalni oblik u bazi podataka (tzv. »*digital phosphor*«) te proslijeđuju izravno na prikaznik. *Tri dimenzije* su: amplituda, vrijeme te razdioba amplituda po vremenu, koja se prikazuje različitim svjetlinom, dok se različitim bojama oslikava ponovljivost valnog oblika, tako se razlikuje prikaz odziva koji se ponavlja nakon svakog okidnog impulsa od onog koji



Sl. 10. Vrlo pojednostavljena blok-shema DPO osciloskopa

se pojavi vrlo rijetko (slika 11). Matematička analiza uzoraka i nadzor nad upravljačkim sučeljem osciloskopa ide paralelnom stazom preko mikroprocesora, koji je inače usko grlo za brzi prihvat i prikaz signala, pa stoga DPO-i prosljeđuju uzorke mnogo brže od tipičnog DSO-a. Budući da ujediniuju neke dobre strane analognog osciloskopa (npr. modulaciju svjetline signala na prikazniku) i DSO-a (kao što je digitalizacija signala ili



Sl. 11. Primjeri prikaza na zaslonu DPO osciloskopa



Slika 12. Izgled suvremenog DPO osciloskopa (ova izvedba ima i ugrađenu tiskaljku za ispis slike s prikaznika na papir)

različite mogućnosti prikaza), prikladni su za prikaz i analizu vrlo složenih signala, npr. modulacija u video i telekomunikacijskoj tehnici, jer omogućuju promatranje detalja signala. Odlikuje ih brzina uzorkovanja do 20 GS/s, frekvencijski opseg do nekoliko gigaherca te duljina zapisa od $5 \cdot 10^4$ do $32 \cdot 10^6$ točaka (slika 12).

SO je predviđen 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. Naime, kod ovih se osciloskopa ulazni signal najprije 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 mjerenog napona. Time je omogućeno uzorkovanje signala čija je frekvencija puno viša od učestalosti uzorkovanja samog osciloskopa, ali je nužan uvjet da je signal periodička funkcija. Budući da je kod obrade signala prvi u slijedu iza ulaza sklop za uzorkovanje, čija je dinamika ograničena, najveći je dopušteni ulazni napon svega nekoliko volta, dok kod DSO-a i DPO-a on iznosi i nekoliko stotina volta. Osim toga, kod ovih je osciloskopa i mnogo manja duljina zapisa od svega par tisuća točaka.

dr. sc. Dušan VUJEVIĆ
dr. sc. Damir ILIĆ