

# **PRINCIP RADA I PRIMENA OSCILOSKOPA**

— priručnik za rad u laboratoriji —

Predrag Pejović

dr Predrag Pejović, redovni profesor  
e-mail: peja@etf.rs  
URL: <http://tnt.etf.rs/~peja/>

PRINCIP RADA I PRIMENA OSCILOSKOPA  
— priručnik za rad u laboratoriji —

elektronski udžbenik

Recenzenti:  
dr Dragutin Salamon, vanredni profesor u penziji  
dr Milan Bjelica, vanredni profesor

Nastavno-naučno veće Elektrotehničkog fakulteta odobrilo je objavljivanje ovog udžbenika odlukom broj 1315 od 12.07.2016. godine.

Izdavač:  
Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu  
Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija

Štampa: P. Pejović, Beograd, 2016.  
Tiraž: 50 primeraka

ISBN: 978-86-7225-060-2



This work is licensed under a  
Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

„Најважнија ствар у сваком мерењу јесте честитост.“

Владислав Ђ. Јовановић,  
„ВЕЖБЕ У ЛАБОРАТОРИЈИ ЗА ЕЛЕКТРИЧНА МЕРЕЊА“,  
десето неизмењено издање, страна 3, Научна књига, Београд, 1967.



# Predgovor izmenjenom izdanju

Prošlo je šesnaest godina od dana kada je napisan predgovor prvom izdanju. Koje je po redu ovo izdanje nije lako ustanoviti, ako je uopšte moguće, pošto je prethodna verzija priručnika štampana kad god je bilo potrebno, sve dok nije učinjena javno dostupnom na internetu. Ono što jeste sigurno je to da je ovo prva izmenjena verzija teksta. Stoga, sada je pogodan trenutak da se osvrnemo na to šta se promenilo za prethodnih šesnaest godina, koje su izmene učinjene i zašto.

Osnovna ideja prilikom izrade prvog izdanja je bila da stavi naglasak na razumevanje principa rada osciloskopa, da izdvoji zajedničke osobine ne vezujući se za pojedini tip osciloskopa. Cilj je da studenti budu sposobljeni da se za kratko vreme prilagode različitim osciloskopima, različitim proizvođača, onima koji su im dostupni, kao i novim modelima koji će se tek pojaviti. Studenti koji sada slušaju predmet Električna merenja verovatno će biti aktivni u struci tokom narednih pedeset godina. Nemoguće je sada predvideti sve činjenice sa kojima će se tokom tog perioda sretati. Ipak, opravdano je prepostaviti da će principi ostati isti. Stoga je naglasak na razumevanju, a ne na memorisanju.

Šta se promenilo od prvog izdanja? Najmanje izmene su doživeli oni osciloskopi koji se koriste na laboratorijskim vežbama. Analogni osciloskop fotografisan za potrebe ovog priručnika još uvek biva pozajmljivan za potrebe završnog eksperimenta iz predmeta Električna merenja. Ujedno, to je i prvi osciloskop koji je autor koristio. Zaista, na njemu su obrazovane generacije studenata.

Nešto više su se izmenili osciloskopi, više po formi nego po suštini. Digitalni osciloskopi su preovladali, katodna cev je potisnuta i zamjenili su je ekrani sa tečnim kristalima. Osciloskopi su postali manji, lakši, jeftiniji. Suština je, međutim, ostala ista, namena je ostala ista, komande su tako slične, funkcije koje su dodate, čiju implementaciju digitalna tehnologija lako omogućava, nadogradnja su na koju se korisnici analognih osciloskopa lako naviknu. Razlika između digitalnih i analognih osciloskopa je u tehnologiji realizacije, ne u suštini. Osnovna kvalitativna prednost koju digitalni osciloskopi nude je sprega sa računaram. Danas je veoma lako iskoristiti digitalni osciloskop kao akvizicioni modul, da prikupi odbirke signala i omogući njihov prenos na računar. Kada su odbirci prikupljeni, sve ostalo je digitalna obrada signala, što omogućava merenje različitih veličina. Štaviše, moguće je i automatsko generisanje tabela, dijagrama i samih izveštaja sa merenja, što se npr. koristi na laboratorijskim vežbama u predmetu Energetska elektronika 2, gde se osciloskop, računar i niz korisničkih programa sprežu koristeći programski jezik Python. Ovakve mogućnosti primene izlaze iz okvira osnovnog kursa električnih merenja, ali se uz dobru osnovu iz niza disciplina veoma lako savladaju kasnije. Slični koncepti su primjenjeni na predmetu Telekomunikaciona merenja, a koliko je to bilo moguće i na

laboratorijskim vežbama iz predmeta Električna merenja.

U izmenjenom izdanju, neposredno nakon ovog predgovora, uključen je predgovor prvom izdanju. Šta se promenilo, šta je prestalo da važi? Samo jedna tvrdnja: „Ova uputstva su studentima najčešće nedostupna.“ Danas su uputstva veoma lako dostupna: na internetu su. Drugo je pitanje imaju li studenti vremena da ih prouče i uoče šta je suština; zato postoji ovaj priručnik. Upravo tu i jesu najveće promene u odnosu na prvo izdanje: najveće promene je doživelo izdavanje udžbeničke literature i dostupnost informacija. Ogroman broj udžbenika je javno dostupan na mreži, kao i celi interaktivni kursevi na platformama kao što su edX ili Coursera. Proizvođači osciloskopa objavljaju svoje nastavne materijale, poput Oscilloscope Tutorial, gde se nudi niz dokumenata, ili Evaluating Oscilloscope Fundamentals. Dokumente je moguće povezati koristeći *hyperlinks*. Stoga, posto ovaj vid novih tehnologija ne zahteva baš nikakva materijalna ulaganja, nema razloga da ne bude primenjen, makar u ovom priručniku.

Najveće promene u odnosu na prvo izdanje priručnika su u formi, ne u suštini. Za slaganje teksta izmenjenog izdanja je korišćen L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X. Sve slike su ponovo izrađene, delom kao fotografije, delom kao crteži i električne šeme koristeći XCircuit, a delom kao dijagrami za čije crtanje su korišćeni program gnuplot ili biblioteka matplotlib za programski jezik Python, u zavisnosti od toga šta je za pojedini dijagram bilo jednostavnije. Takođe, programski jezik Python je korišćen u PyLab okruženju za sva izračunavanja potrebna za generisanje dijagrama, kao i za automatsko generisanje teksta za reference [7], [8] i [9], koje se mogu smatrati pomoćnim delom ovog priručnika. Ove tehničke izmene izvršene su kako bi se grafički kvalitet priručnika usaglasio sa vremenom i kako bi se omogućilo lako kasnije unapređivanje. Ako je prethodno izdanje bilo složeno tako da je bilo potrebno ručno renumerisati slike kako bi se dodala jedna, onda se sa priličnom sigurnošću moglo očekivati da slika nikada neće biti dodata. I nije bila dodata. Na naslovnoj strani dokumenta se nalazi datum izdavanja, pa je preporučljivo uvek koristiti poslednje izdanje. U nekom trenutku, iz administrativnih razloga, priručnik će biti recenziran i registrovan kako bi dobio ISBN. Ta verzija priručnika će biti „zamrznuta“ i kao takva u neizmenjenoj verziji ostati na sajtu, a pojaviće se „beta verzija“ novog izdanja, koja će biti unapređivana i korigovana.

Priručnik je planiran za čitanje na elektronskim uređajima, kada su svi *hyperlinks* aktivni, pa se stoga štampanje ne preporučuje. Dodatni razlog za to je obim teksta: format je promenjen da bi se broj strana smanjio, a dodatni tekst je uzrokovao znatno povećanje broja strana. U izradi teksta je korišćen isključivo slobodni softver. U skladu sa softverom koji je korišćen, ovaj priručnik je izdat pod Creative Commons Autorstvo — Deliti pod istim uslovima (Attribution-ShareAlike — CC BY-SA) licencom.

Promene suštine priručnika su uglavnom proširenja pojedinih delova. Dodat je niz slika, prvenstveno vezanih za izgled i primenu digitalnih osciloskopa. Prošireno je poglavljje o kompenzaciji sondi osciloskopa, a dodat je i odeljak o strujnim sondama. Neočekivano, prošireno je i poglavljje o Lisažuovim figurama. Autor priručnika je dugo smatrao da se u klasičnoj literaturi Lisažuovim figurama daje neopravданo velik značaj, da bi u izmenjenom izdanju značajno proširio razmatranje Lisažuovih figura, čak i u odnosu na klasičnu literaturu. Razlog tome nije vezan za električna

merenja, gde je primena Lizažuovih figura ostala na nivou kao i u vreme prvog izdanja: autor, koji često u svom radu meri faznu razliku, nijednom ih nije korišto ni pre prvog izdanja, ni u šesnaestogodišnjem periodu do izmenjenog izdanja. Nasuprot tim argumentima, Lizažuove figure imaju velik obrazovni značaj kao vizuelizacija kretanja sistema u faznoj ravni, kao uvod u prikazivanje krivih magnećenja feromagnetskih materijala, prikaz nelinearnih karakteristika prenosa pojedinih elektronskih kola i analizu dinamičkih sistema. Za sve ovo se može iskoristiti osciloskop, uz uslov da korisnik zna kako. Zato je detaljno obrađena analiza Lizažuovih figura, sa naglaskom na razumevanje dobijene slike, a automatsko generisanje slika i teksta je omogućilo nastanak Atlasa Lizažuovih figura [7], [8] i [9]. Saglasno ovome, dodata su i poglavља о snimanju prenosnih karakteristika nelinearnih kola i krivih magnećenja feromagnetskih materijala, sa ilustracijama iz primene na konkretnim sistemima koji su tipični predstavnici svoje klase.

Na kraju, uz rizik da neko ostane neopravdano izostavljen, osećam potrebu da se zahvalim kolegama sa kojima sam tokom dugog niza godina najbliže sarađivao u nastavi i primeni osciloskopa. Pre svih, treba da se zahvalim koleginicama Jeleni Ćertić, Nadici Miljković i Milici Janković, koje su rukovodile radom Laboratorije za električna merenja i obezbeđivale povratnu spregu prateći rezultate nastave. Sa kolegom Dragutinom Salamonom, koji je istoimeni predmet predavao studentima Odseka za energetiku, sve vreme sam imao značajne razmene mišljenja, potpuno razumevanje i uspešnu saradnju. Kolega Salamon me je uputio na misao našeg pret-hodnika Vladislava Đ. Jovanovića, citiranu na početku, i obezbedio referencu. Sa kolegom Milanom Bjelicom sam imao korisne razgovore na temu primene električnih merenja u telekomunikacijama, merenja na kolima sa raspodeljenim parametrima i umrežavanja digitalnih mernih uređaja. Svi do sada pomenuti su primer kako saradnja može biti uspešna uprkos tome što su članovi različitih katedri, ili možda upravo zbog toga. Takođe, izuzetnu zahvalnost dugujem i dugogodišnjim saradnicima i prijateljima Vladanu Božoviću i Dušanu Ćurapovu, koji su kroz svoj savestan rad u Laboratoriji za elektroniku pratili rezultate nastave koju izvodim i davali korisne sugestije za unapređenje. Oni su po osnovu dugogodišnje saradnje i druženja uvek bili slobodni da mi iskreno kažu kako vide rezultate mog rada. Na kraju, na posebnom mestu se zahvaljujem profesoru Draganu Stankoviću, od koga je mnogo toga vezanog za moj rad u oblasti električnih merenja počelo. Posebno treba istaći njegovo angažovanje na uvođenju analize merne nesigurnosti u nastavu i stalno preispitivanje fundamentalnih koncepcata na kojima naše znanje počiva. Profesor Stanković mi je stalno pružao pomoć i podršku i kroz brojne razgovore inspirisao svojim širokim znanjem, entuzijazmom i dobrim namerama. A dobre namere, iako često zanemarene, važan su početak svakog obrazovnog procesa.

U Beogradu, 9.9.2015. godine,

Autor



# Predgovor

Osciloskop nesumnjivo predstavlja najznačajniji indikatorski i merni instrument svake laboratorije za elektroniku. Mnoštvo mogućnosti koje osciloskop pruža, izvanredna mogućnost vizuelizacije i široka oblast primene, uslovjavaju poznavanje rukovanja osciloskopom preduslovom za bilo kakav eksperimentalni rad u elektronici. Ospozobljavanje studenata da samostalno uspešno rukuju osciloskopom je minimalni cilj svakog kursa električnih merenja. Obrazovanje inženjera elektrotehnike bez potpunog ospozobljavanja za rukovanje osciloskopom je nepotpuno.

Klasični udžbenici električnih merenja osciloskop tretiraju prevashodno teorijski, a za niz za praksu značajnih detalja upućuju na uputstva za dostupni osciloskop. Ova uputstva su studentima najčešće nedostupna. Uz to, razvojem osciloskopa je došlo do konvergencije komandi do gotovo standardnog skupa, čak i do skoro standardnog rasporeda komandi na kontrolnoj ploči. Zanimljivo je da moderni digitalni osciloskopi za niz komandi koje imaju i analogni osciloskopi koriste gotovo identična rešenja. Stoga je postalo smisleno napisati priručnik za korišćenje osciloskopa koji bi imao opšiju važnost od uputstva za upotrebu određenog osciloskopa.

U ovom priručniku su prvo prikazani principi rada osciloskopa, a zatim je naveden niz metoda za posmatranje talasnih oblika signala i različita merenja na njima. Teorijska razmatranja su ilustrovana na primerima osciloskopa Tektronix 2205 i 2215A. Osnovna namena priručnika je da pomogne studentima u savladavanju rukovanja osciloskopom, koje se obično predaje u okviru kurseva električnih merenja, kao i da pomogne studentima u izradi laboratorijskih vežbi iz elektronike. Autor se nada da će ovaj priručnik biti od koristi i svima ostalima koji manje ili više uspešno koriste osciloskop.

U Beogradu, 9.9.1999. godine,

Autor

x

# Sadržaj

<b>1 Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Princip rada osciloskopa</b>	<b>5</b>
2.1 Katodna cev . . . . .	5
2.2 Struktura osciloskopa . . . . .	11
2.3 Pojačavači ulaznih signala . . . . .	11
2.4 Sistem za horizontalno skretanje . . . . .	15
2.5 Sistem za sinhronizaciju . . . . .	19
2.6 Prikazivanje dva signala na ekranu osciloskopa . . . . .	28
2.7 Osvrt na digitalne osciloskope . . . . .	29
<b>3 Sonde za osciloskope</b>	<b>31</b>
3.1 Naponske sonde . . . . .	31
3.2 Kompenzacija naponskih sondi . . . . .	32
3.3 Strujne sonde . . . . .	36
<b>4 Merenja pomoću osciloskopa</b>	<b>41</b>
4.1 Graduacija ekrana . . . . .	41
4.2 Merenje napona . . . . .	41
4.3 Merenje amplitude . . . . .	43
4.4 Merenje jednosmerne komponente . . . . .	44
4.5 Posmatranje razlike potencijala dva čvora . . . . .	45
4.6 Merenje vremenskih intervala . . . . .	46
4.7 Merenje periode i frekvencije . . . . .	47
4.8 Korišćenje pokazivača i automatizovanih merenja . . . . .	48
4.9 Merenje trajanja usponske i silazne ivice . . . . .	49
4.10 Merenje trajanja impulsa, pauze i faktora ispunjenosti . . . . .	52
4.11 Merenje fazne razlike . . . . .	53
4.12 Merenje fazne razlike primenom Lisažuovih figura . . . . .	55
4.13 Određivanje odnosa frekvencija primenom . . . . .	64
4.14 Snimanje prenosnih karakteristika . . . . .	67
4.15 Snimanje krivih magnećenja . . . . .	68
4.15.1 Primer snimanja krivih magnećenja primenom digitalnog osciloskopa . . . . .	72
<b>5 Problem sa uzemljenjem</b>	<b>79</b>



# Uvod

Osciloskop je uz univerzalni instrument za merenje napona, struje i otpornosti najčešće korišćen merni instrument u elektronici. Osnovna namena mu je prikazivanje vremenskih dijagrama periodičnih naponskih signala, ali se može koristiti i za prikazivanje međusobne zavisnosti dva naponska signala (merenje faze i frekvencije primenom Lizažuovih figura, snimanje prenosne karakteristike nelinearnih rezistivnih kola, snimanje krive magnećenja feromagnetskih materijala), kao i prikazivanje aperiodičnih signala. Uz primenu odgovarajućih strujnih sondi koje konvertuju strujne signale u naponske, moguće je prikazivanje vremenskih oblika strujnih signala. Takođe, uz primenu odgovarajućih senzora koji konvertuju neelektrične fizičke veličine u električni napon, moguće je vršiti posmatranja i merenja na neelektričnim signalima. Ovakva raznovrsnost mogućnosti i činjenica da je informacija koju osciloskop pruža najčešće slika, dijagram, a ne jedan broj kao kod većine ostalih instrumenata za električna merenja, čini osciloskop složenim za primenu i zahteva obuku korisnika kako bi se iskoristile mogućnosti koje osciloskop pruža. Uspeh u primeni osciloskopa mnogo više nego kod drugih instrumenata zavisi od kvalifikovanosti operatera za njegovu svestranu i uspešnu primenu. Višegodišnja iskustva pokazuju da studenti najčešće nepotpuno ovladaju tehnikom primene osciloskopa tokom studija, a da potpunu rutinu i uvid u sve mogućnosti osciloskopa steknu tek po završetku studija, kroz praktičan rad, ukoliko ostanu u struci. Cilj ovog priručnika je da omogući studentima da se efikasno pripreme za rad u laboratoriji i potpuno ovladaju tehnikom primene osciloskopa uz relativno mali broj laboratorijskih vežbi. U priručniku su prikazani osnovni principi rada osciloskopa, čije je poznavanje neophodno za njegovu uspešnu primenu, kao i opisi tehnika sinhronizacije osciloskopa i merenja pomoću osciloskopa. Sinhronizacija osciloskopa je jedan od prvih i najvećih problema sa kojim se korisnici sreću tokom obučavanja za rad sa osciloskopom, pa je problemu sinhronizacije slike na osciloskopu posvećena posebna pažnja.

Poslednjih godina je došlo do značajnog pada cene i unapređenja performansi digitalnih osciloskopa, tako da oni apsolutno dominiraju. Savremeni digitalni osciloskopi imaju komande veoma slične komandama analognog osciloskopa, a pružaju i dodatne pogodnosti u oblasti lakog prenošenja rezultata merenja na računar, njihove dalje digitalne obrade, kao i niza automatizovanih merenja na posmatranom vremenskom dijagramu. Osim ovoga, digitalni osciloskopi napuštaju koncept katodne cevi kao indikatorskog sistema i prelaze na displej na bazi tečnih kristala, čime se bitno smanjuju dimenzije i težina osciloskopa. Dodatna pogodnost je i ekran u boji kojim su opremljeni kvalitetniji osciloskopi, koji omogućava lakše razlikovanje signala koji se posmatraju. Kod osciloskopa, kao i kod drugih instrumenata, sve više prodire primena računara kao mernog sistema („virtuelni instrumenti“), svodeći merenje na



Slika 1.1: Analogni osciloskop Tektronix 2215A.

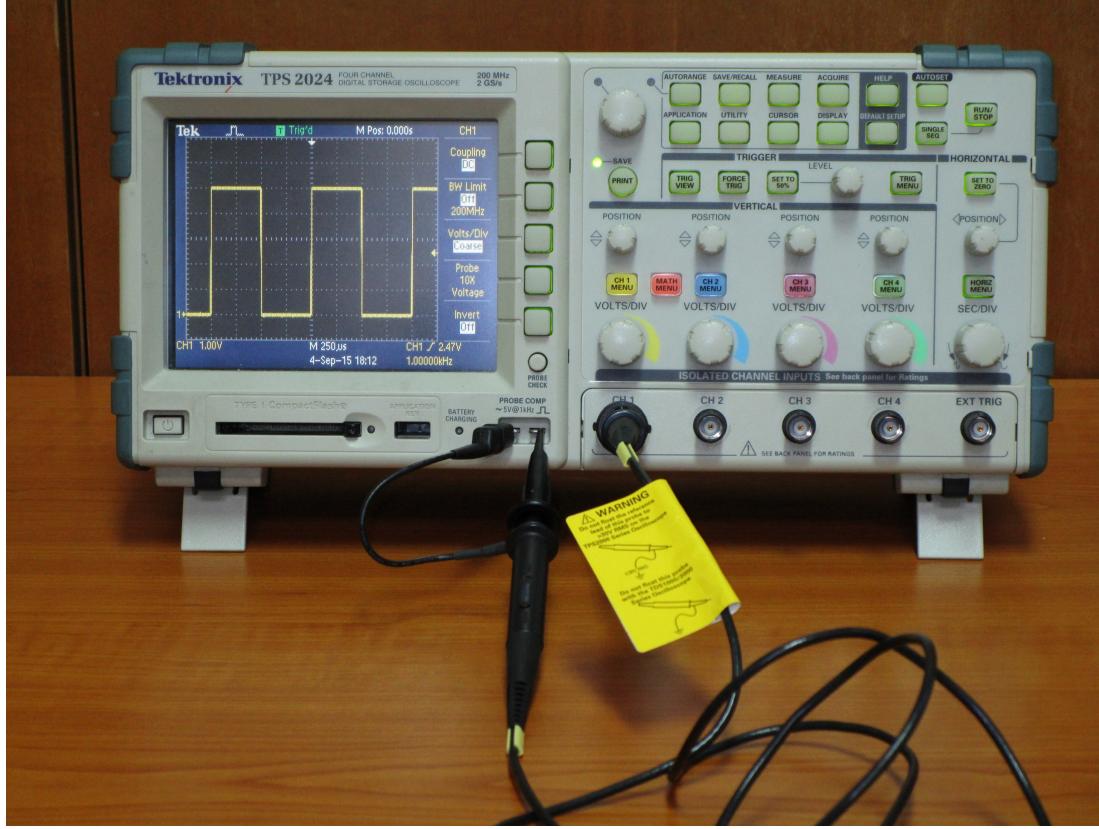
senzorski deo koji vrši konverziju posmatrane fizičke veličine u električni napon ili struju, konverziju tog signala u digitalni oblik i njegovu naknadnu digitalnu obradu.

U ovom priručniku će prvo biti obrađeni analogni osciloskopi koji su još uvek jako zastupljeni u laboratorijama i industriji, razumevanje čijeg rada je preduslov za uspešnu primenu osciloskopa. Potom će biti analizirani digitalni osciloskopi sa naznačavanjem njihovih dodatnih mogućnosti u poređenju sa analognim osciloskopima.

Priručnik je baziran na primeru četiri osciloskopa proizvođača Tektronix, na analognim osciloskopima Tektronix 2215A [1] i Tektronix 2205 [2], koji se još uvek koriste na laboratorijskim vežbama i digitalnim osciloskopima Tektronix TDS 210 [3] (u novijoj verziji Tektronix TDS 1000) i Tektronix TPS 2024 [4]. Komande navedenih osciloskopa su veoma slične, a istovremeno su slične i komandama osciloskopa drugih proizvođača, što je uslovljeno načinom rada i primenom osciloskopa.

Osciloskop Tektronix 2215A je prikazan na slici 1.1, na kojoj se vidi ekran osciloskopa na kome se prikazuju dijagrami posmatranih signala, komande osciloskopa i priključna mesta za osciloskopske sonde. Osciloskop je dvokanalni, što znači da omogućava istovremeno posmatranje dva nezavisna signala. Kako će kasnije biti reči, ti signali nisu potpuno nezavisni, oni imaju isti referentni potencijal, pa bi precizna formulacija osnovne namene ovog osciloskopa bila posmatranje do dva nezavisna potencijala u jednom električnom kolu. Primenom pogodnih sondi i pogodnim povezivanjem i podešavanjem osciloskopa, ove osnovne mogućnosti se mogu proširiti, o čemu će biti reči u ovom priručniku.

Kao što je već rečeno, digitalni osciloskopi su obično znatno manji i lakši od



Slika 1.2: digitalni osciloskop Tektronix TPS 2024.

analognih, ali imaju i veći i pregledniji ekran koji kod kvalitetnijih osciloskopa ima mogućnost prikazivanja različitih boja. Kao primer, na slici 1.2 je prikazan digitalni osciloskop Tektronix TPS 2024, snimljen tokom kompenzacije naponske sonde, o čemu će biti reči u odeljku 3.2. Komande analognih i digitalnih osciloskopa su po funkciji jako slične, mada su različito implementirane. Osnovna prednost koju digitalni osciloskopi nude je veza sa računaram koja omogućava lako dokumentovanje i arhiviranje rezultata, kao i naknadnu digitalnu obradu. Laka komunikacija između osciloskopa i računara [5] otvara niz novih primena, pošto je moguće automatski, prema zadatom programu, podesiti parametre osciloskopa za željeno merenje, prikupiti rezultate merenja ili odbirke posmatranog signala, a kasnijim digitalnim procesiranjem izvršiti niz merenja na posmatranim signalima. Na primer, u [6] se u okviru dve laboratorijske vežbe vrše merenja efektivne vrednosti struje i napona, srednje vrednosti struje i napona, spektra signala, aktivne snage, prividne snage, faktora snage, faznog ugla, i ukupnog harmonijskog izobličenja numeričkom obradom podataka preuzetih sa digitalnog osciloskopa na personalni računar korišćenjem programskog jezika Python sa odgovarajućim bibliotekama (modulima) i isključivom primenom slobodnog softvera. Naknadnom obradom više rezultata se određuje i koeficijent korisnog dejstva sistema. Štaviše, rezultati merenja se automatski sređuju u tabele, automatski se generišu dijagrami, kao i sam izveštaj sa vežbe. U [6] su dati i programi koji opisane obrade podataka vrše i bitno smanjuju količinu ljudskog rada koji bi bio potrošen na nekreativne poslove.

Virtuelni instrumenti zasnovani na osciloskopu i upravljanje osciloskopom

pomoću računara prevazilaze obim osnovnog kursa iz električnih merenja, ali su istovremeno zanimljiv koncept sa velikim potencijalom za primenu, na koji valja skrenuti pažnju zainteresovanim studentima.

# Princip rada osciloskopa

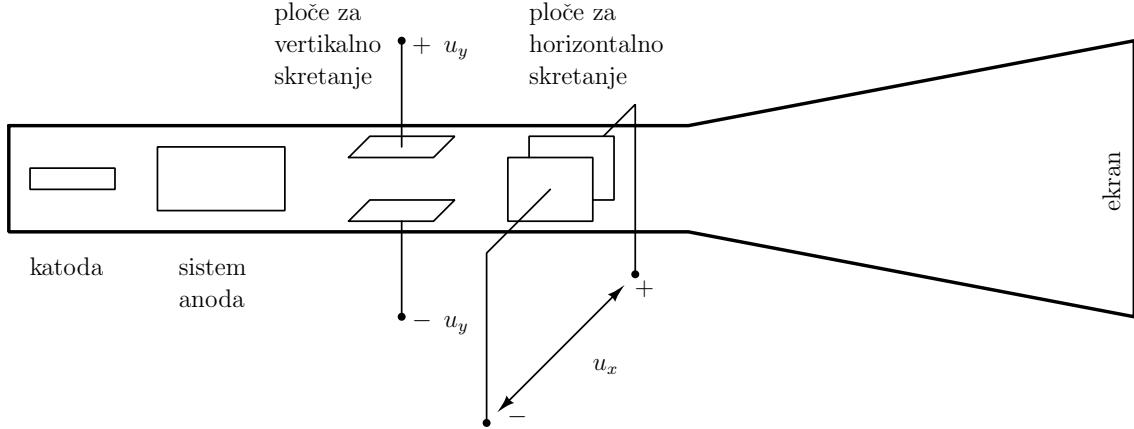
## Katodna cev

Kod svih analognih i jednog broja digitalnih osciloskopa katodna cev (crt, cathode ray tube) je jedan od osnovnih elemenata. Namena katodne cevi je da se na njenom ekranu prikažu dijagrami posmatranih signala. Analizu principa rada osciloskopa prikazanu u ovom priručniku započećemo od katodne cevi. Katodna cev ima izuzetan istorijski značaj, od otkrića elektrona, otkrića rentgenskih zraka, prvih posmatranja signala, nastanka televizije, preko koncipiranja osciloskopa, sve do primene u osciloskopima koji su se donedavno proizvodili. Ujedno, katodna cev je i poslednja od elektronskih cevi koja se zadržala u širokoj primeni. Ideje značajne za razvoj katodne cevi u formi u kojoj se koristi u osciloskopima razvile su se kroz eksperimente sa Kruksovom cevi koji su čak doveli do slučajnog otkrića rentgenskih zraka.

Katodna cev se sastoji iz staklene posude (cevi) iz koje je evakuisan vazduh. Presek cevi je prikazan na slici 2.1. Princip rada katodne cevi se zasniva na emisiji svetlosti sa fluorescentnog ekrana kada je pogoden snopom ubrzanih elektrona. U katodnoj cevi se nalazi izvor elektrona, katoda, koji elektrone emituje na principu termoelektronske emisije. Katoda se zagрева se do usijanja grejnim vlaknom i usled intenzivnog termičkog kretanja neki elektroni je napuštaju. Tako se oko katode stvara oblak elektrona koji se ubrzavaju i fokusiraju sistemom anoda. Funkcija sistema anoda je da usmeri kretanje elektrona ka ekranu katodne cevi, da ih ubrza i da ih fokusira u uzak snop. Fokusiranje i ubrzavanje elektrona se vrši na elektrostatickom principu. Regulacijom potencijala pojedinih anoda iz anodnog sistema može se podešavati fokusiranost elektronskog mlaza na ekranu, kao i njegov intenzitet. Održavanje snopa elektrona se postiže pogodnim profilisanjem električnog polja, što nije jednostavan zadatak jer se elektroni kao identično nanelektrisane čestice međusobno odbijaju, za razliku od mlaza tečnosti gde površinski napon održava mlaz na okupu.

Formirani elektronski mlaz se na putu ka ekranu kreće kroz sistem za skretanje. Sistem za skretanje elektronskog mlaza je kod osciloskopa zasnovan na elektrostatickom principu, čime je omogućena dobra linearност, mala snaga potrebna za skretanje i veliki propusni opseg. Sistem za skretanje elektronskog mlaza se sastoji iz dva para ploča, para ploča za vertikalno skretanje mlaza (par od dve horizontalno postavljene ploče) i para ploča za horizontalno skretanje mlaza (par od dve vertikalno postavljene ploče).

Posmatrajmo par ploča za vertikalno skretanje elektronskog mlaza, prikazan na



Slika 2.1: Katodna cev.

slici 2.2. Prepostavimo da je na ploču doveden napon  $u_y$  i da je komponenta brzine kretanja elektrona usmerena ka ekranu osciloskopa po izlasku iz sistema anoda  $v_z$ . Pod dejstvom primjenjenog napona, u prostoru između ploča je stvoreno električno polje intenziteta

$$|\vec{E}| = \frac{u_y}{d} \quad (2.1)$$

gde je  $d$  rastojanje između ploča sistema za skretanje, označeno na slici 2.2. U analizi skretanja elektrona pod dejstvom električnog polja zanemarićemo efekte krajeva. Na elektron koji se kreće u električnom polju nastalom dovođenjem napona  $u_y$  u prostoru između ploča deluje sila

$$\vec{F} = m_e \frac{d\vec{v}}{dt} = -q \vec{E} \quad (2.2)$$

gde je  $q = 1.6 \times 10^{-19}$  C elementarno nanelektrisanje (apsolutna vrednost), a  $m_e = 9.1 \times 10^{-31}$  kg je masa elektrona. Kako je sila koja deluje na elektron usmerena duž vertikalne ( $y$ ) ose, jednačina (2.2) se može pisati u skalarnom obliku kao

$$m_e \frac{dv_y}{dt} = -q E_y = -q \frac{u_y}{d}. \quad (2.3)$$

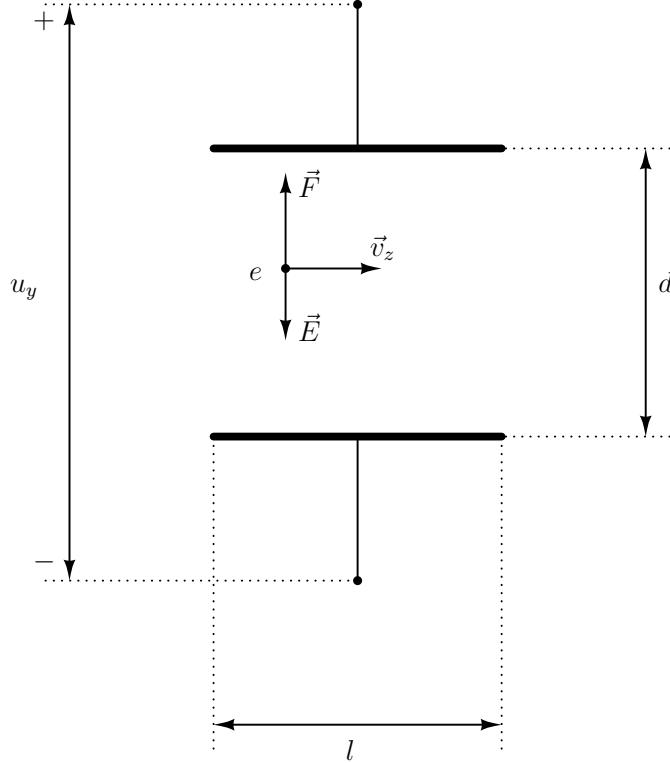
Zanemarujući efekte krajeva i smatrajući intenzitet električnog polja između ploča sistema za skretanje konstantnim, možemo preći na konačne razlike

$$m_e \frac{\Delta v_y}{\Delta t} = -q \frac{u_y}{d} \quad (2.4)$$

gde je  $\Delta v_y$  promena komponente brzine elektrona duž  $y$  ose, a  $\Delta t$  vreme koje protekne tokom kretanja elektrona u prostoru između ploča sistema za skretanje, odnosno vreme tokom koga je elektron bio izložen delovanju električnog polja skretnog sistema. Vreme  $\Delta t$  je dato sa

$$\Delta t = \frac{l}{v_z} \quad (2.5)$$

gde je  $l$  dužina ploča sistema za skretanje, označena na slici 2.2.



Slika 2.2: Ploče za vertikalno skretanje elektronskog mlaza.

Kako je elektron pre ulaska u sistem za skretanje imao komponentu brzine duž  $y$  ose jednaku nuli, promena te komponente njegove brzine tokom kretanja kroz sistem za skretanje je jednaka krajnjoj vrednosti brzine elektrona duž  $y$  ose,  $v_y$ ,

$$\Delta v_y = v_y - 0 = v_y. \quad (2.6)$$

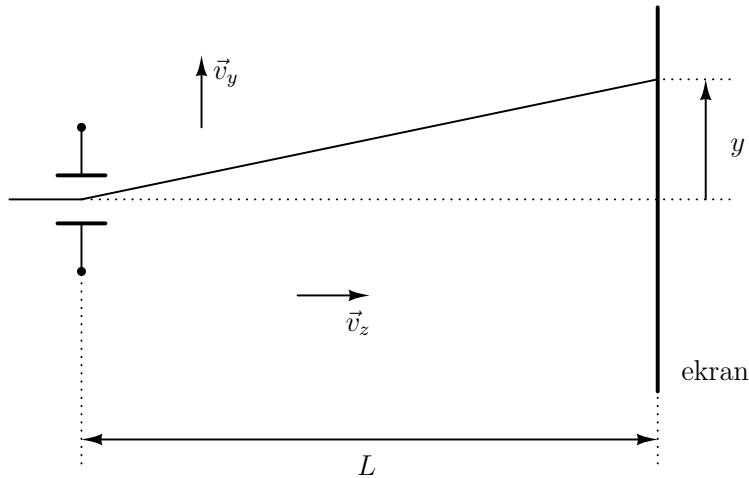
Zamenom (2.5) i (2.6) u (2.4) dobija se krajnja vrednost brzine elektrona duž  $y$  ose nakon izlaska iz sistema za vertikalno skretanje kao

$$v_y = -\frac{q}{m_e} \frac{l}{d} \frac{u_y}{v_z} \quad (2.7)$$

Analogno se može izvesti i jednačina koja opisuje ubrzavanje elektrona u sistemu za horizontalno skretanje, duž  $x$  ose,

$$v_x = -\frac{q}{m_e} \frac{l}{d} \frac{u_x}{v_z} \quad (2.8)$$

Da bi odredili mesto udara elektronskog mlaza u ekran osciloskopa, gde će ostati svetleći trag, posmatrajmo kretanje elektrona nakon izlaska iz sistema za skretanje, ilustrovano na slici 2.3. Elektron se nakon izlaska iz sistema za skretanje kreće po inerciji, i njegova komponenta brzine duž  $y$  ose se ne menja. Pod pretpostavkom da je unutar sistema za skretanje elektron prešao zanemarljivo mali put u  $y$  pravcu (po paraboličkoj putanji), što je prihvatljiva pretpostavka obzirom na već učinjeno zanemarivanje efekta krajeva, koordinata  $y$  u kojoj će elektron udariti u ekran se



Slika 2.3: Kretanje elektrona nakon izlaska iz sistema za skretanje.

može odrediti iz odnosa njegove brzine duž horizontalne ose od katode ka ekranu  $v_z$  i komponente njegove brzine duž  $y$  ose  $v_y$  kao

$$y = L \frac{v_y}{v_x} \quad (2.9)$$

gde je  $L$  rastojanje od sistema za skretanje mlaza do ekrana katodne cevi, označeno na slici 2.3.

Zamenom (2.9) u (2.7) dobija se

$$y = -\frac{q}{m_e} \frac{l}{d} L \frac{u_y}{v_z^2} \quad (2.10)$$

Komponenta brzine elektrona u smeru ka ekranu osciloskopa,  $v_z$ , posledica je ubrzavanja elektrona u sistemu za ubrzavanje i fokusiranje elektronskog mlaza. Pod pretpostavkom da je u sistemu za ubrzavanje elektron prešao potencijalnu razliku  $U_a$ , kinetička energija elektrona po izlasku iz sistema za ubrzavanje je

$$\frac{m_e v_z^2}{2} = q U_a \quad (2.11)$$

odakle je

$$v_z^2 = \frac{2}{m_e} q U_a. \quad (2.12)$$

Zamenom (2.12) u (2.10), za skretanje elektronskog mlaza duž  $y$  ose se konačno dobija

$$y = \frac{1}{2} L \frac{l}{d} \frac{u_y}{U_a}. \quad (2.13)$$

Analognim postupkom može se izvesti jednačina za skretanje elektronskog mlaza duž  $x$  ose kao

$$x = \frac{1}{2} L \frac{l}{d} \frac{u_x}{U_a}. \quad (2.14)$$

Na osnovu jednačina (2.13) i (2.14) može se zaključiti da je koordinata na kojoj elektronski mlaz udara u ekran osciloskopa proporcionalna naponu primjenjenom



Slika 2.4: Prednja ploča osciloskopa Tektronix 2215A.

na pločama sistema za skretanje. Ovaj zaključak ima fundamentalan značaj za dalju analizu rada osciloskopa i predstavlja vezu između geometrije slike na ekranu osciloskopa i primenjenih napona na skretnom sistemu koji kontrolišu sliku katodne cevi. Zadatak ostalih sklopova osciloskopa je da obezbede potrebne napone na skretnom sistemu kako bi se omogućilo iscrtavanje dijagrama signala u željenom opsegu ulaznih napona i frekvencije.

Ekran osciloskopa je sa unutrašnje strane presvučen jedinjenjem na bazi fosfora koji ima osobinu fluorescencije ili preciznije katodne luminiscencije, čime se na mestu udara elektronskog mlaza o ekran stvara svetleća tačka. Tačka izložena elektronskom snopu nastavlja da svetli i neko vreme nakon prestanka delovanja elektronskog mlaza. Ova osobina je od značaja kada se posmatraju sporo promenljivi signali i kada persistencija osvetljenosti tačke pogodene elektronskim mlazom treba da obezbedi veću trajnost i malo treperenje posmatranog dijagrama.

Na slici 2.4 je prikazana prednja ploča analognog osciloskopa Tektronix 2215A. Na levoj strani prednje ploče se vidi ekran osciloskopa, dok se na desnoj strani nalaze brojne komande osciloskopa.

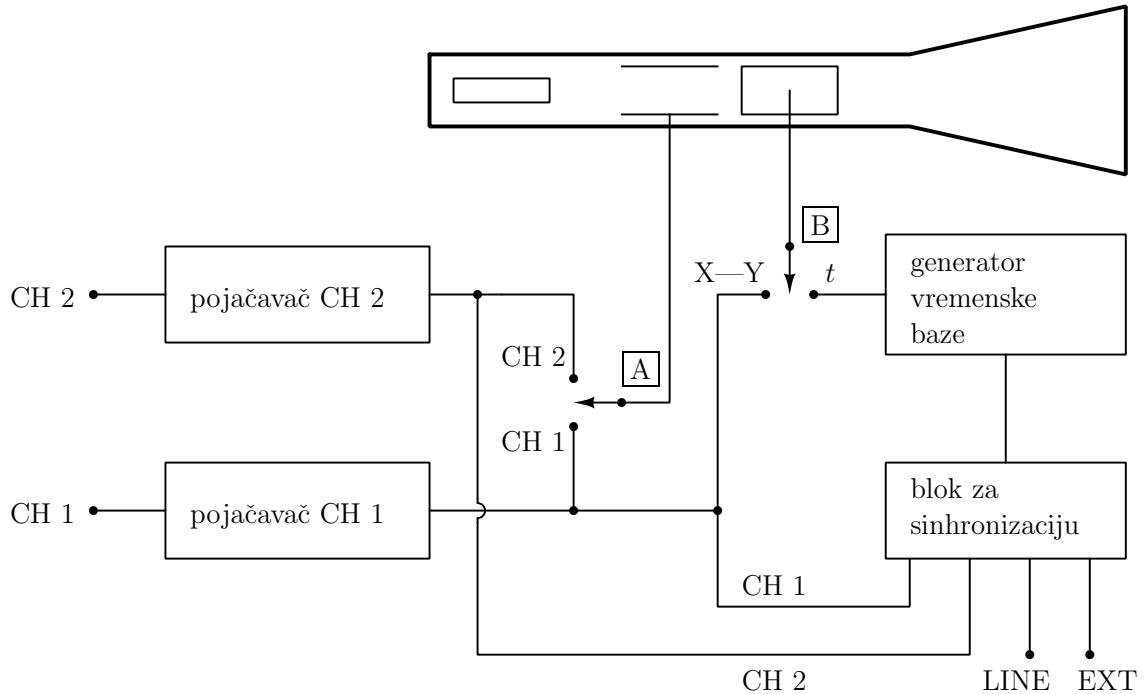
Na slici 2.5 je prikazan ekran osciloskopa i komande za osnovnu kontrolu slike na osciloskopu. Ekran razmatranog osciloskopa je približno širine 10 cm i visine 8 cm. Ove dimenzije ekrana se mogu smatrati tipičnim. Čak i u slučaju da ekran nije te dimenzije, najčešći odnos njegove širine i visine je 10 : 8. Ekran osciloskopa ima graduaciju ucrtanu sa unutrašnje strane katodne cevi, kako bi se izbegla greška očitavanja usled paralakse. Ekran je izgraduisan na podeoke, 8 vertikalnih i 10 horizontalnih. Podeok se na kontrolnim preklopnicima i u uputstvima za osciloskope označava sa DIV (division), a kao „jedinicu mere“ (koja svakako nije SI) ćemo ga u ovom tekstu označavati sa „div“. Na ekranu osciloskopa su podebljane dve centralne ose, koje se koriste za merenja na posmatranim dijagramima. Na tim osama je uneta i dodatna graduacija kojom je svaki podeok podeljen na pet jednakih delova (u laboratorijskom slengu se ti delovi nazivaju „crtice“, nasuprot podeocima koji se nazivaju „kockice“). Vrednost jednog pod-podeoka („crtice“) iznosi 0.2 podeoka (0.2 div ili 0.2 „kockice“). Podrazumevajući maksimalnu rezoluciju definisanu rastojanjem između dva pod-podeoka na graduisanim osama osciloskopa, rezolu-



Slika 2.5: Ekran i komande za kontrolu elektronskog mlaza.

cija osciloskopa po vertikalnoj osi je  $0.2/8 = 2.5\%$  pune skale, dok je rezolucija po horizontalnoj osi  $0.2/10 = 2\%$  pune skale.

Osim ekrana, na slici 2.5 se vide i komande za opštu kontrolu slike na osciloskopu. Sa ON/OFF je označeno dugme za uključenje i isključenje osciloskopa, pored koga se nalazi zelena indikatorska svetleća dioda koja označava da je osciloskop uključen. Potenciometrom označenim sa FOCUS se podešava potencijal fokusirajuće anode u sistemu za fokusiranje i ubrzavanje elektronskog mlaza, čime se podešava oštrina slike na osciloskopu, odnosno fokusira elektronski mlaz da žiža bude u ravni ekrana osciloskopa. Sa PROBE ADJUST je označen pristup izvoru signala koji se koristi za testiranje i kompenzaciju sonde (probe) osciloskopa, o čemu će biti više reči kasnije u odeljku 3.2. Veoma korisna komanda osciloskopa je ostvarena tasterom označenim sa BEAM FIND. Veoma često se desi da je zbog promene posmatranog signala ili promene položaja nekog od kontrolnih komandi dijagram prikazanog signala izvan slike osciloskopa. Pritiskom na taster BEAM FIND sabija se slika na osciloskopu i može se utvrditi gde se elektronski snop kreće, levo, desno, iznad ili ispod ekrana. Pogodnim podešavanjem se onda lako može elektronski mlaz dovesti na ekran, o čemu će biti više reči kasnije. Komanda BEAM FIND je karakteristična za analogne osciloskope i nema je kod digitalnih, gde njenu funkciju preuzima komanda AUTO SET. Trimer označen sa TRACE ROTATION služi za podešavanje nagnutosti traga elektronskog mlaza. Njegovo podešavanje je potrebno veoma retko. Suštinski, on reguliše „pre-slušavanje“ između sistema za vertikalno i horizontalno skretanje elektronskog mlaza i postoji samo kod analognih osciloskopa. Često podešavanje zahteva potenciometar označen sa INTENSITY, kojim se reguliše osvetljenost ekrana. Intenzitet osvetljenosti treba prilagoditi spoljnjem svetlu tako da se na ekranu vidi jasna slika, prijatna za posmatranje. Osvetljenost najčešće treba povećati prilikom posmatranja signala



Slika 2.6: Blok šema osciloskopa.

veoma visokih i veoma niskih frekvencija.

## Struktura osciloskopa

Struktura osciloskopa je prikazana blok šemom sa slike 2.6. Osim katodne cevi, razmatrane u prethodnom poglavljiju, na slici 2.6 su blokovima predstavljeni pojačavači ulaznih signala (često ih nazivaju i „pojačavači za vertikalno skretanje elektronskog mlaza“ i „pojačavači kanala“), generator vremenske baze i blok za sinhronizaciju slike. Ovi blokovi predstavljaju osnovne podsisteme osciloskopa i biće detaljnije razmotreni. Blokovi su međusobno povezani preklopnicima **A** i **B**. Preklopnik **A** reguliše koji će od ulaznih signala (kanala) biti prikazan na ekranu osciloskopa (prvi, drugi, ili oba), dok se preklopnikom **B** određuje hoće li biti prikazan vremenski dijagram ili dijagram međusobne zavisnosti dva signala.

## Pojačavači ulaznih signala

Pojačavači ulaznih signala su složeni sistemi i mogu biti predstavljeni blok šemom sa slike 2.7. Ulazni signal se do pojačavača dovodi preko preklopnika sa tri položaja: AC, DC i GND. Na slici 2.8 je prikazan deo prednje ploče osciloskopa sa komandoma za kontrolu rada pojačavača ulaznih signala na kojoj se vide dva pomenuta tropoložajna preklopnika, odmah iznad BNC priključaka za sonde.

U položaju GND ulazni signal nije priključen na ulaz pojačavača, već je ulaz pojačavača vezan za nulti potencijal (masu). Ovaj položaj se koristi prilikom

podešavanja položaja nultog nivoa napona na ekranu osciloskopa, koji ne mora nužno biti na centralnoj horizontalnoj liniji graduacije ekrana.

Za potrebe daljeg izlaganja, na ovom mestu je neophodno napraviti kratku digresiju i objasniti dekompoziciju signala na jednosmernu i naizmeničnu komponentu. Prepostavimo da posmatramo periodičan signal  $v(t)$  takav da je  $v(t + kT) = v(t)$ , gde je  $k \in \mathbb{Z}$  ceo broj, a  $T$  je osnovni period signala. Jednosmerna komponenta  $V$  signala  $v(t)$  je njegova srednja vrednost,

$$V = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (2.15)$$

dok se vrednost samog signala  $v(t)$  naziva trenutna vrednost. Naizmenična komponenta signala je razlika trenutne vrednosti i srednje vrednosti

$$\hat{v}(t) = v(t) - V \quad (2.16)$$

pa se signal na ovaj način dekomponuje na zbir jednosmerne i naizmenične komponente kao

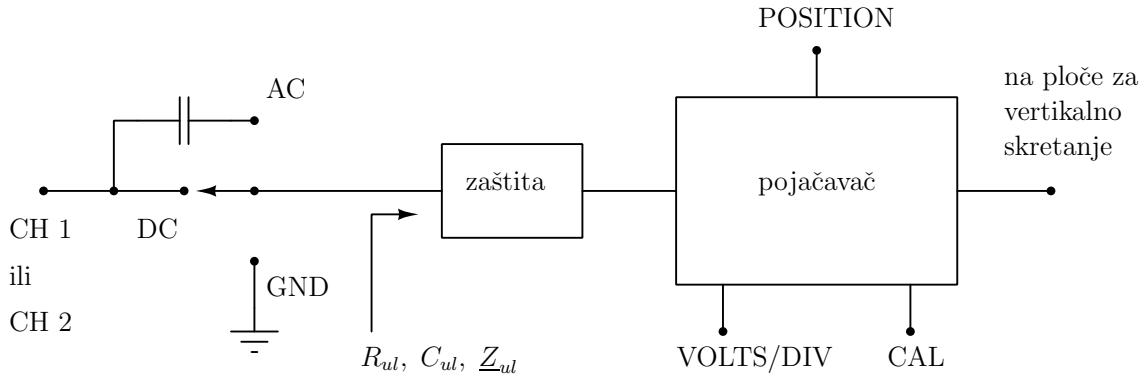
$$v(t) = V + \hat{v}(t). \quad (2.17)$$

Ova dekompozicija je veoma česta u elektronskim kolima i sistemima automatskog upravljanja, gde naizmenična komponenta predstavlja varijaciju oko ustaljene srednje vrednosti i u komunikacionim sistemima ona prenosi informaciju. Stoga je često potrebno osciloskopom posmatrati bilo trenutnu vrednost signala, bilo naizmeničnu komponentu, koja po amplitudi može biti mnogo manja od jednosmerne komponente, a ponekad je potrebno i odrediti jednosmernu komponentu, o čemu će biti reči u odeljku 4.4. Kada je to moguće, uobičajeno je da se trenutna vrednost signala označava malim slovom sa indeksom koji je veliko slovo, npr.  $v_A$ , jednosmerna komponenta velikim slovom sa indeksom koji je veliko slovo,  $V_A$ , a naizmenična komponenta sa malim slovom i indeksom koji je malo slovo  $v_a$ , pa je  $v_A = V_A + v_a$ . Ova konvencija ima poteškoća sa numeričkim indeksima, pa se u tom slučaju ili u slučaju da indeksa nema koristi  $\hat{\cdot}$  da označi naizmeničnu komponentu, kao što je učinjeno u (2.17) prilikom definisanja.

Sada možemo da se vratimo na analizu ulaznog tropoložajnog preklopnika i objasnimo položaje DC i AC.

U položaju DC, signal se direktno dovodi na ulaz pojačavača. Na taj način se omogućava posmatranje trenutnih vrednosti signala (ne samo jednosmerna komponenta, nego i jednosmerna i naizmenična komponenta istovremeno).

U položaju AC se signal dovodi na ulaz pojačavača preko razdvojnog kondenzatora koji sa ulaznom otpornošću pojačavača čini filter propusnik visokih frekvencija. Na taj način se na rednom kondenzatoru izdvaja jednosmerna komponenta signala, a pojačavaču se prosleđuje samo njegova naizmenična komponenta. Sa položajem AC treba biti oprezan prilikom posmatranja signala niskih frekvencija, poput napona mreže. Filter propusnik visokih frekvencija koji redni kondenzator čini sa ulaznom otpornošću pojačavača najčešće ima propusni opseg koji počinje na oko 10 Hz i nije precizno definisan. Stoga je na frekvencijama reda 50 Hz moguće očekivati izobličenje posmatranog signala, pa pri posmatranju niskofrekvenčkih signala treba biti svestan ovog ograničenja i po mogućnosti izbegavati AC položaj preklopnika.



Slika 2.7: Pojačavač ulaznog signala.

U svakom slučaju, pri radu sa niskofrekvenčnim signalima na nekom od signala posmatrane frekvencije koji nema izraženu jednosmernu komponentu treba proveriti ponašanje pojačavača sa AC položajem preklopnika poređenjem sa istim signalom posmatranim sa DC položajem preklopnika.

Posle preklopnika za selekciju tipa signala koji se prosleđuje pojačavaču, a nekad i pre preklopnika, nalazi se zaštita. Zaštita je najčešće elektronski sklop koji bi trebalo da zaštitи pojačavač ulaznog signala od prevelikog napona priključenog na ulaz osciloskopa. Maksimalno dopušteni napon na ulazu osciloskopa je specificiran u uputstvu za osciloskop i zavisi od frekvencije. Na primer, kod osciloskopa Tektronix 2215A maksimalna trenutna vrednost napona na ulazu koja neće dovesti do oštećenja je 400 V na frekvencijama do 10 kHz, da bi na frekvencijama iznad 500 kHz bila svega 12.5 V. Iskustvo pokazuje da se ne treba previše oslanjati na zaštitu i da treba voditi računa o primjenjenom naponu na ulazu, kako ne bi došlo do velikog oštećenja osciloskopa.

Pojačavač treba da obezbedi pojačanje signala u veoma širokom propusnom opsegu, tipično od 0 do 100 MHz. Retki su osciloskopi kod kojih je propusni opseg pojačavača manji od 10 MHz. Osim toga, pojačavač treba da obezbedi promenu pojačanja u diskretnim skokovima (slika 2.8, preklopnik za podešavanje pojačanja je označen sa VOLTS/DIV), kao i kontinualnu promenu pojačanja u opsegu između dva diskretna položaja preklopnika za podešavanje pojačanja, što se postiže crvenim potenciometrom označenim sa CAL, lociranim na samom preklopniku. Takođe, zbog potrebe optimalnog korišćenja ekrana osciloskopa, potrebno je obezbediti kontrolisano dodavanje jednosmerne komponente izlaznom naponu pojačavača, čime se podešava položaj nultog naponskog nivoa kada je položaj ulaznog preklopnika GND. Ovo podešavanje se postiže potenciometrom označenim sa POSITION ili  $\pm$  POSITION. Osim navedenih mogućnosti, kod većine osciloskopa je moguće smanjiti propusni opseg pojačavača kako bi se smanjio šum pri posmatranju niskofrekvenčnih signala. Na našem primeru moguće je smanjiti propusni opseg na 10 MHz prekidačem označenim sa BW LIMIT (bandwidth limit), istovremeno na oba kanala. Kod digitalnih osciloskopa obično je moguće uključiti ili isključiti ovakav filter na svakom kanalu nezavisno. Takođe, moguće je invertovati izlaz drugog pojačavača (dijagram signala se množi sa -1) uključenjem prekidača INVERT.

Ulagani signali se dovode sondama ili preko koaksijalnog kabla na BNC konektore



Slika 2.8: Komande za kontrolu pojačavača za vertikalno skretanje mlaza.

označene sa CH 1 i CH 2 (od channel 1 i channel 2). Sonde za osciloskop mogu biti direktnе, sa prenosnim odnosom 1 : 1, poput prikazane na slici 3.2, ili sa oslabljivačem, što je mnogo češći slučaj, sa prenosnim odnosom 10 : 1 ili 100 : 1. U praksi se najčešće sreću sonde sa prenosnim odnosom 10 : 1. Prenosni odnos sonde treba uzeti u obzir prilikom merenja na posmatrаниm vremenskim dijagramima i zanemarivanje ove činjenice je čest izvor grešaka. U jednom periodu (2000-tih godina) su bile popularne sonde sa preklopnikom kojima se prenosni odnos može izabrati da bude 1 : 1 ili 10 : 1, kakva je sonda prikazana na slici 3.1. Pri radu sa ovakvим sondama treba posebnu pažnju položaju tog preklopnika, kako se ne bi dogodilo da stvarni položaj preklopnika ne odgovara onom položaju koji korisnik podrazumeva.

Pojačanje pojačavača se očitava na skali preklopnika za podešavanje pojačanja, označenog sa VOLTS/DIV na slici 2.8. Veoma je važno naglasiti da skala tog preklopnika važi samo ako je dugme za kontinualnu promenu pojačanja, označeno brojem 10, u krajnjem desnom položaju na koji pokazuje strelica iznad natpisa CAL (calibrated). Taj položaj se još zove i locked position i prepoznaje se po blagom otporu koji mehanizam potenciometra pruža pri uvođenju i izvođenju iz položaja. Veoma česta greška jeste merenje bez prethodne provere da li je dugme za kontinualnu promenu pojačanja u poziciji kada podela skale važi. Stoga pre svakog merenja treba proveriti da li podela skale važi ili je neki prethodni korisnik osciloskopa izveo dugme za kontinualnu promenu pojačanja iz kalibriranog položaja, što „korisnici“ često rade iz dosade.

Pojačanje pojačavača se izražava u voltima po podeoku (VOLTS/DIV) i očitava se na mestu za očitavanje označenom sa 1X za sonde bez slabljenja i na mestu

za očitavanje označenom sa 10X PROBE za sonde (probe) sa slabljenjem od 10 puta. Za sonde sa slabljenjem većim od 10 i za strujne sonde potrebno je izvršiti preračunavanje. Prednost digitalnih osciloskopa je što preračunavanje automatski vrše i imaju veću ponudu prenosnih odnosa koja pokriva sve tipične naponske i strujne sonde.

U grupi komandi prikazanoj na slici 2.8 nalazi se i preklopnik za izbor kanala čiji će signal biti prikazan na ekranu osciloskopa. Mogući položaji ovog preklopnika su CH 1, kada se prikazuje signal doveden na prvi kanal, CH 2, kada se prikazuje signal doveden na drugi kanal i BOTH kada se prikazuju oba signala.

Način na koji će biti prikazani signali ako je preklopnik za izbor kanala u položaju BOTH zavisi od položaja preklopnika koji ima moguće položaje ALT, CHOP i ADD. U položaju ALT (alternate) se naizmenično iscrtavaju dijagrami signala dovedenih na ulaze osciloskopa. U jednom horizontalnom skretanju mlaza sa leva na desno iscrtava se signal sa CH 1, a u sledećem prolazu signal sa CH 2. U položaju CHOP (chop), tokom jednog prelaska sa leva na desno elektronski mlaz naizmenično „skače“ sa crtanjem signala sa CH 1 na signal sa CH 2. Frekvencija prebacivanja sa iscrtavanja signala po CH 1 na iscrtavanje po CH 2 je oko 500 kHz. Položaj CHOP je izuzetno povoljno rešenje kod prikazivanja signala niskih frekvencija, kad relativno mala perzistencija ekrana dovodi do treperenja slike (blinking). Signale visokih frekvencija, kada se primećuje diskontinuitet u iscrtavanju signala ako je preklopnik u položaju CHOP, prijatnije je posmatrati u položaju ALT. U položaju preklopnika ADD na ekranu se prikazuje samo jedan signal koji odgovara zbiru signala dovedenih na CH 1 i CH 2.

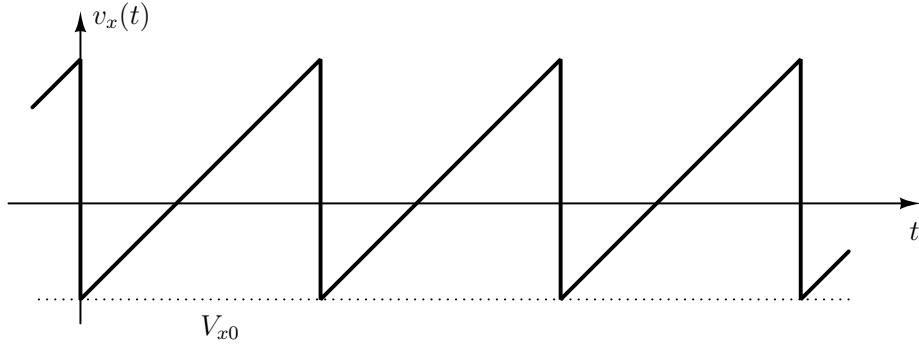
Kod digitalnih osciloskopa, zbog drugačijeg načina formiranja slike, ne postoje komande ekvivalentne položajima preklopnika ALT i CHOP. Funkcija pomenutog preklopnika u položaju ADD je proširena i obično se naziva MATH, kada je moguće prikazati rezultat različitih matematičkih operacija nad signalima sa CH 1 i CH 2, što uključuje sabiranje, oduzimanje, a često i množenje. Ove mogućnosti su direktna posledica njihove jednostavne realizacije u digitalnoj tehnologiji.

## Sistem za horizontalno skretanje

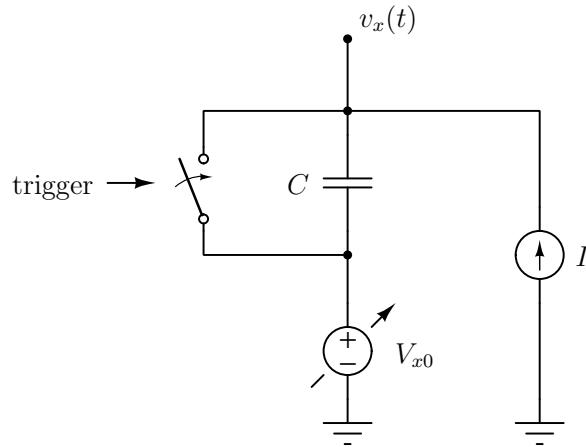
Na osciloskopu se najčešće posmatraju vremenski dijagrami periodičnih signala. Do sada je pokazano da je skretanje elektronskog mlaza u katodnoj cevi direktno proporcionalno naponu na pločama za skretanje. Ukoliko je ulazni signal doveden na ploče za vertikalno skretanje, položaj svetle tačke na  $y$  osi osciloskopa će indikovati vrednost posmatranog signala. Kako bi se dobio vremenski dijagram, horizontalna osa treba da bude graduisana po vremenu, odnosno duž horizontalne ose treba posmerati elektronski snop konstantnom brzinom, tako da je  $x$  koordinata elektronskog mlaza data sa

$$x(t) = k_t t \quad (2.18)$$

gde je  $k_t$  brzina kretanja mlaza duž  $x$  ose izražena u podeocima po sekundi, div/s. Po prelasku celog ekrana osciloskopa (sweep) potrebno je vratiti elektronski mlaz u krajnji levi položaj, kako bi se otpočelo novo iscrtavanje dijagrama. Ovakvo kretanje elektronskog mlaza obezbeđuje napon na pločama za horizontalno skretanje  $v_x$ , čiji je



Slika 2.9: Napon na pločama za horizontalno skretanje.



Slika 2.10: Principska šema generatora linearne vremenske baze.

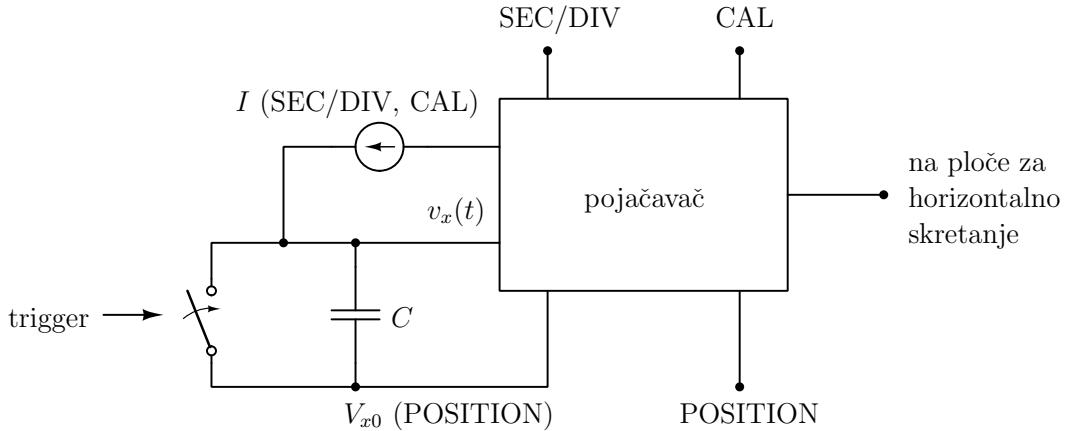
vremenski dijagram prikazan na slici 2.9. Tokom uspona napona  $v_x$ , elektronski mlaz se konstantnom brzinom kreće po ekranu sa leva na desno. Tokom kratkotrajnih silaznih ivica, elektronski snop se brzo vraća u krajnji levi položaj ekrana.

Kola za generisanje testerastog napona prikazanog na slici 2.9 se nazivaju generatori linearne vremenske baze. Principska šema generatora linearne vremenske baze je prikazana na slici 2.10. Rad generatora linearne vremenske baze se zasniva na punjenju kondenzatora izvorom konstantne struje, čime se napon na njegovim krajevima linearno menja, i naglom pražnjenju kondenzatora primenom prekidača. U slučaju da je u vremenskom trenutku  $t = 0$  prekidač sa slike 2.9 otvoren, napon  $v_x$  će se do narednog uključenja menjati po zakonu

$$v_x(t) = -V_{x0} + \frac{I}{C} t. \quad (2.19)$$

Stanje prekidača u generatoru linearne vremenske baze kontroliše sistem za synchronizaciju slike, o čemu će biti više reči kasnije, u odeljku 2.5.

Sistem za horizontalno skretanje elektronskog mlaza kao osnovni element sadrži generator linearne vremenske baze, ali treba i da omogući promenu podele vremenske ose u širokim granicama, kako u diskretnim koracima, tako i kontinualno između njih, nalik podešavanju pojačavača ulaznih signala. Osim toga, potrebno je omogućiti i horizontalno pozicioniranje slike na osciloskopu.



Slika 2.11: Sistem za horizontalno skretanje mlaza.

Promena podele vremenske ose se postiže promenom struje punjenja kondenzatora i/ili kapacitivnosti samog kondenzatora, bilo u diskretnim koracima, bilo kontinualno između njih. Horizontalno pozicioniranje slike na ekranu osciloskopa se postiže podešavanjem napona  $V_{x0}$  (slike 2.10 i 2.11) koji definiše poziciju krajnjeg levog položaja elektronskog mlaza.

Komande sistema za horizontalno skretanje (horizontal controls) kod osciloskopa Tektronix 2215A su prikazane na slici 2.12. Natpisom POSITION (ili  $\Leftarrow$ POSITION $\Rightarrow$ ) je označen potenciometar za horizontalno pozicioniranje slike, kojim se utiče na promenu napona  $-V_{x0}$ , a time i na tačku na ekranu osciloskopa u kojoj počinje iscrtavanje dijagrama. Natpisom SEC/DIV označen je preklopnik za podešavanje podele vremenske ose. Dodatna oznaka A and B ispred natpisa SEC/DIV je specifičnost osciloskopa Tektronix 2215A koji ima dva sistema za horizontalno skretanje mlaza: osnovni (A) i pomoćni (B), o čemu će biti još biti reči u ovom odeljku. Slično kao i kod pojačavača signala za vertikalno skretanje elektronskog mlaza, tako je i kod sistema za horizontalno skretanje moguće kontinualno menjati podeлу vremenske ose između dva diskretna položaja preklopnika za podešavanje podele vremenske ose. To se postiže izvođenjem potenciometra sa crvenim dugmetom, označenim sa CAL, iz kalibrisanog (krajnjeg desnog) položaja. Okretanjem tog potenciometra kontinualno se može menjati podela vremenske ose. Podela vremenske ose označena na preklopniku SEC/DIV važi samo ako je potenciometar za kontinualnu promenu podele vremenske ose u kalibrisanom položaju. U tom slučaju, podela vremenske ose prema položaju preklopnika prikazanom na slici 2.12 je  $1\mu\text{s}$  po podeoku ( $1\mu\text{s}/\text{div}$ ). Osim mogućnosti diskretnе i kontinualne promene podele vremenske ose, na većini osciloskopa je moguće i povećati brzinu skretanja elektronskog mlaza 10 puta. To se kod razmatranog osciloskopa postiže povlačenjem crvenog dugmeta (CAL) ka sebi, što je označeno sa  $\times 10$  (izbledela oznaka iznad strelice koja ukazuje na kalibrisani položaj). Kada je brzina elektronskog mlaza povećana povlačenjem crvenog dugmeta, na njemu se vidi žuti prsten. Pre bilo kakvog merenja za koje je bitna podela vremenske ose, treba proveriti da li je potenciometar za kontinualnu promenu podele vremenske ose u kalibrisanom položaju, čiji pravac pokazuje strelica na crvenom dugmetu sa slike 2.12, i da li je dugme za povećavanje brzine skretanja mlaza u osnovnom položaju (žuti prsten se



Slika 2.12: Komande za kontrolu vremenske baze osciloskopa.

ne vidi).

Kako je nagovešteno, jedna od specifičnosti osciloskopa Tektronix 2215A jeste postojanje dva sistema za horizontalno skretanje mlaza. Drugi sistem je pomoći (u laboratorijskom slengu „B trigger“) i služi sa isticanje detalja sa vremenskog dijagrama koji se posmatra u drugoj, detaljnijoj podeli vremenske ose. Primer takvog posmatranja signala je prikazan na slici 2.13, gde je uzlazna ivica signala prikazana sa drugom razmerom vremenske ose na istom dijagramu, primenom drugog sistema za horizontalno skretanje mlaza. Oba sistema za skretanje mlaza su zasnovana na istom principu, pomoći generatora linearne vremenske baze i prekidača kojim se kondenzator prazni i iscrtavanje vraća u polazni položaj.

Komande za kontrolu pomoćnog sistema za horizontalno skretanje mlaza se prikazane delom na slici 2.9, a delom na slici 2.12. Potenciometrom označenim sa A/B SWP SEP (A/B SWeeP SEParation) se podešava vertikalni položaj slike sa pomoćnog sistema u odnosu na sliku sa osnovnog sistema, pa je zato ova komanda grupisana sa ostalim komandama za kontrolu vertikalne ose na slici 2.9, i ima efekat sličan okretanju potenciometra POSITION na sistemu za vertikalno skretanje mlaza. Preklopnikom HORIZONTAL MODE, sa položajima A, ALT i B se bira sistem za horizontalno skretanje mlaza. Položaj A odgovara osnovnom sistemu, položaj ALT naizmenično iscrtava sliku sa osnovnog i sa pomoćnog sistema, dok položaj B kontrolu horizontalnog skretanja mlaza predaje pomoćnom sistemu. Potenciometar sa metalnim dugmetom i brojačem označen sa B DELAY TIME POSITION kontroliše vreme koje protekne od početka iscrtavanja slike po osnovnom sistemu za horizontalno skretanje, do početka iscrtavanja slike po pomoćnom sistemu. To vreme se