

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.

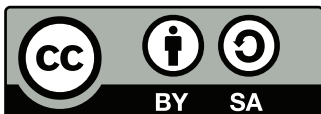
Izdavač:

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 osposobljeni da se za kratko vreme prilagode različitim osciloskopima, različitih 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 pretpostaviti 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 zamenili su je ekrani sa tečnim kristalima. Osciloskopi su postali manji, lakši, jeftiniji. Suština je, međutim, ostala ista, namena je ostala ista, komande su jako 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 računarom. 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 primenjeni 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 osciloscopa objavljuju svoje nastavne materijale, poput Oscilloscope Tutorial, gde se nudi niz dokumenata, ili Evaluating Oscilloscope Fundamentals. Dokumente je moguće povezati koristeći *hyperlinks*. Stoga, pošto 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 \LaTeX . 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 osciloscopa. Prošireno je poglavlje o kompenzaciji sonde osciloscopa, a dodat je i odeljak o strujnim sondama. Neočekivano, prošireno je i poglavlje o Lisažuovim figurama. Autor priručnika je dugo smatrao da se u klasičnoj literaturi Lisažuovim figurama daje neopravdano 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 koristio 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 poglavlja o 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 saradivao u nastavi i primeni osciloskopa. Pre svih, treba da se zahvalim kolegincama Jeleni Čertić, 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 prethodnika 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 koncepata 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, uslovljavaju poznavanje rukovanja osciloskopom preduslovom za bilo kakav eksperimentalni rad u elektronici. Osposobljavanje studenata da samostalno uspešno rukuju osciloskopom je minimalni cilj svakog kursa električnih merenja. Obrazovanje inženjera elektrotehnike bez potpunog osposobljavanja 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 osciloscopa 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 smisljeno napisati priručnik za korišćenje osciloscopa koji bi imao opštiju važnost od uputstva za upotrebu određenog osciloscopa.

U ovom priručniku su prvo prikazani principi rada osciloscopa, a zatim je naveden niz metoda za posmatranje talasnih oblika signala i različita merenja na njima. Teorijska razmatranja su ilustrovana na primerima osciloscopa 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

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Princip rada osciloscopa	5
2.1	Katodna cev	5
2.2	Struktura osciloscopa	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 osciloscopa	28
2.7	Osvrt na digitalne osciloskope	29
3	Sonde za osciloskope	31
3.1	Naponske sonde	31
3.2	Kompenzacija naponskih sondi	32
3.3	Strujne sonde	36
4	Merenja pomoću osciloscopa	41
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 osciloscopa	72
5	Problem sa uzemljenjem	79

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 sonde 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 prodira primena računara kao mernog sistema („virtuelni instrumenti“), svodeći merenje na



Slika 1.1: Analogni osciloskop Tektronix 2215A.

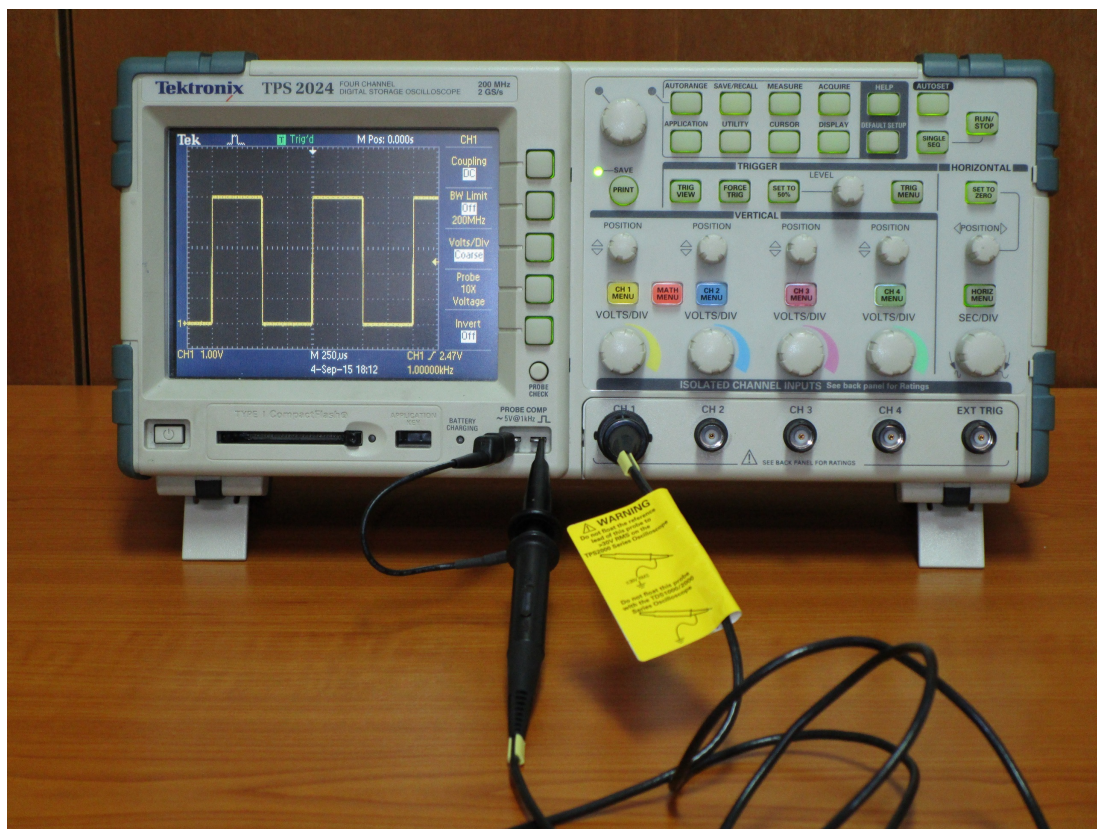
senzorski deo koji vrši konverziju posmatrane fizičke veličine u električni napon ili struju, konverziju tog signala u digitalni oblik i njegovu naknadnu digitalnu obradu.

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 sonda 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 računarem 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 osciloscopa

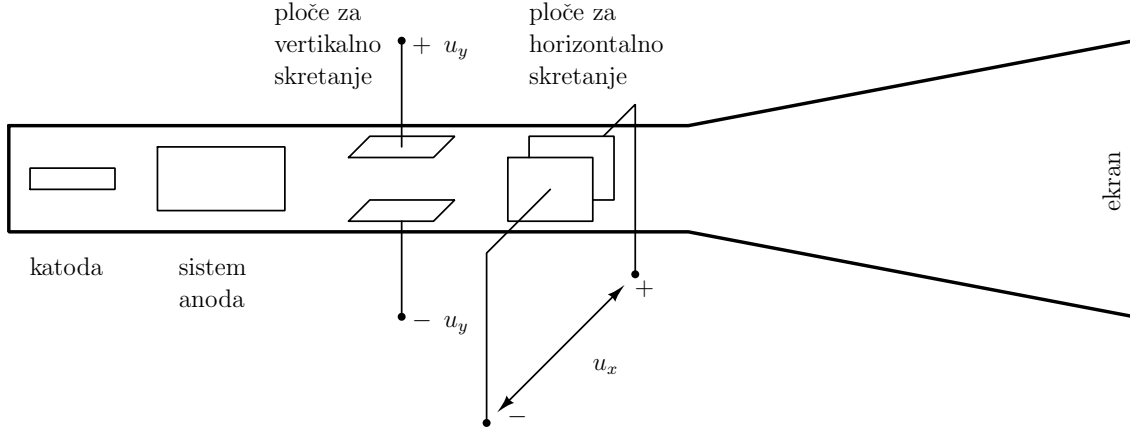
Katodna cev

Kod svih analognih i jednog broja digitalnih osciloscopa 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 osciloscopa prikazanu u ovom priručniku započecemo od katodne cevi. Katodna cev ima izuzetan istorijski značaj, od otkrića elektrona, otkrića rentgenskih zraka, prvih posmatranja signala, nastanka televizije, preko koncipiranja osciloscopa, 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 pogođen snopom ubrzanih elektrona. U katodnoj cevi se nalazi izvor elektrona, katoda, koji elektrone emituje na principu termoelektronske emisije. Katoda se zagreva 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 elektrostatičkom 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 naelektrisane 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 osciloscopa zasnovan na elektrostatičkom principu, čime je omogućena dobra linearnost, 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. Pretpostavićemo da je na ploče doveden napon u_y i da je komponenta brzine kretanja elektrona usmerena ka ekranu osciloskopa po izlasku iz sistema anoda v_z . Pod dejstvom primenjenog 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 naelektrisanje (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

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

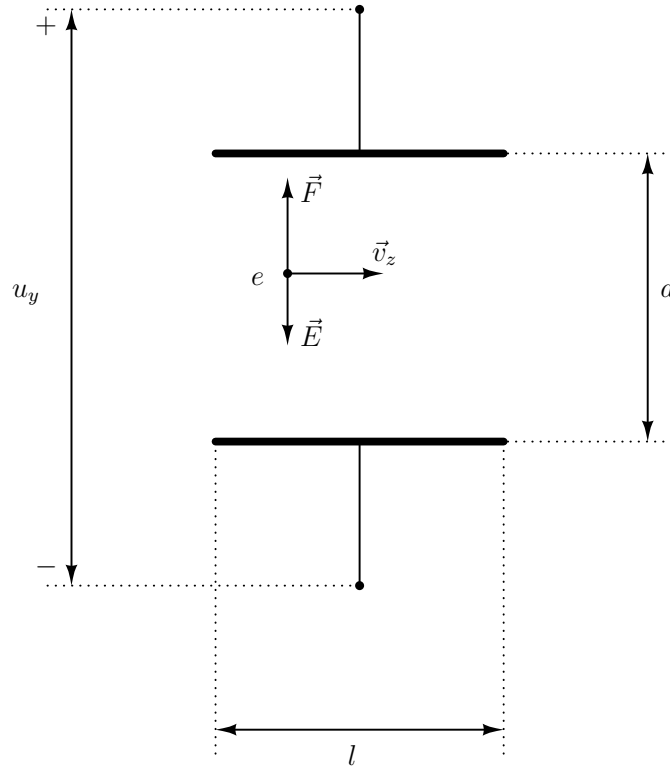
Zanemarujući efekte krajeva i smatrajući intenzitet električnog polja između ploča sistema za skretanje konstantnim, možemo preći na konačne razlike

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

gde je Δv_y promena komponente brzine elektrona duž y ose, a Δt 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 Δt 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 ,

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

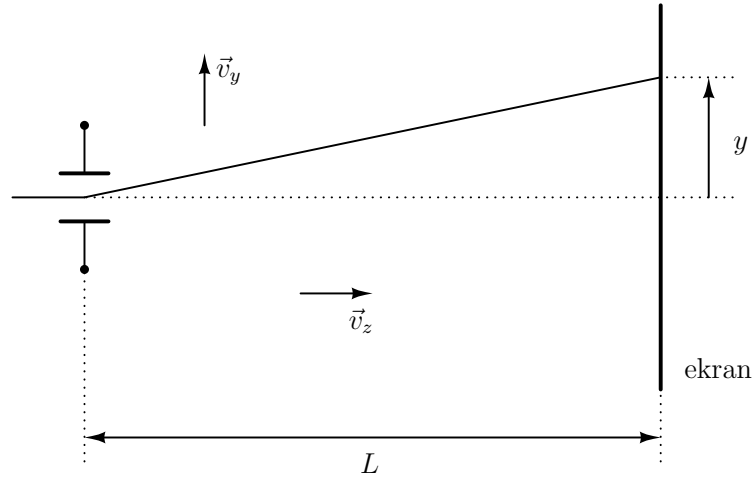
Zamenom (2.5) i (2.6) u (2.4) dobija se krajnja vrednost brzine elektrona duž y ose nakon izlaska iz sistema za vertikalno skretanje kao

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

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 osciloscopa, 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 osciloscopa proporcionalna naponu primenjenom



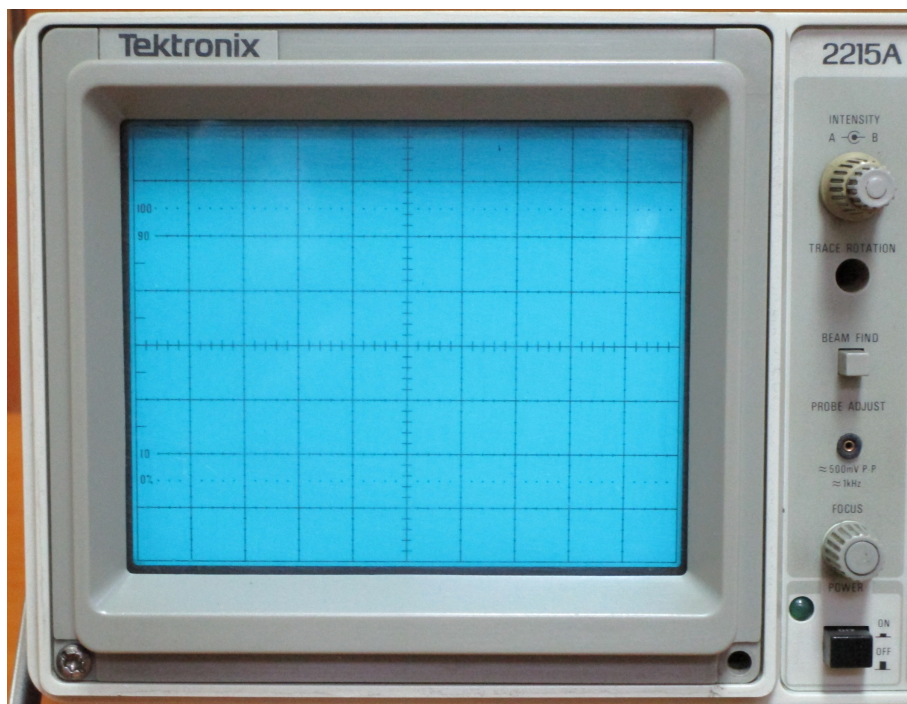
Slika 2.4: Prednja ploča osciloskopa Tektronix 2215A.

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 koje 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 perzistencija osvetljenosti tačke pogođene 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.

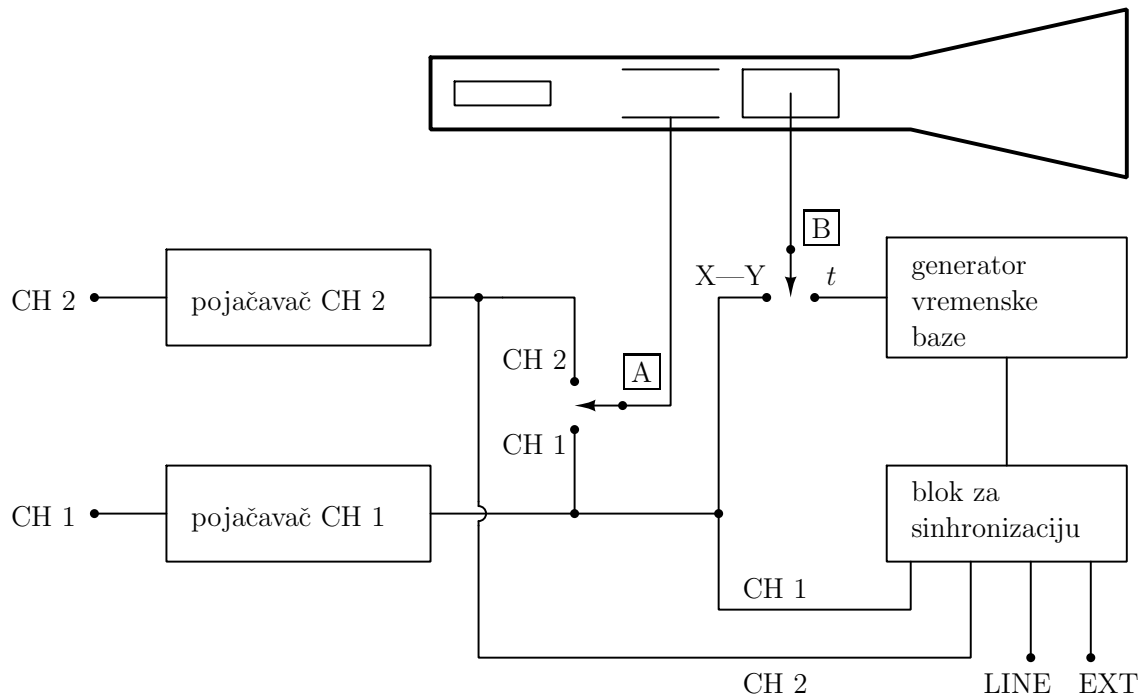
Na slici 2.5 je prikazan ekran osciloskopa i komande za osnovnu kontrolu slike na osciloskopu. Ekran razmatranog osciloskopa je približno širine 10 cm i visine 8 cm. Ove dimenzije ekrana se mogu smatrati tipičnim. Čak i u slučaju da ekran nije te dimenzije, najčešći odnos njegove širine i visine je 10 : 8. Ekran osciloskopa ima graduaciju ucrtanu sa unutrašnje strane katodne cevi, kako bi se izbegla greška očitavanja usled paralakse. Ekran je izgrađen 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 graduanim osama osciloskopa, rezolu-



Slika 2.5: Ekran i komande za kontrolu elektronskog mlaza.

cija osciloscopa 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 uključanje i isključenje osciloskopa, pored koga se nalazi zelena indikatorska svetleća dioda koja označava da je osciloskop uključen. Potencijetrom 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 nagutosti 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 potencijetrom 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 poglavlju, 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 preklopnicama **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 komandama 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. Pretpostavimo 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

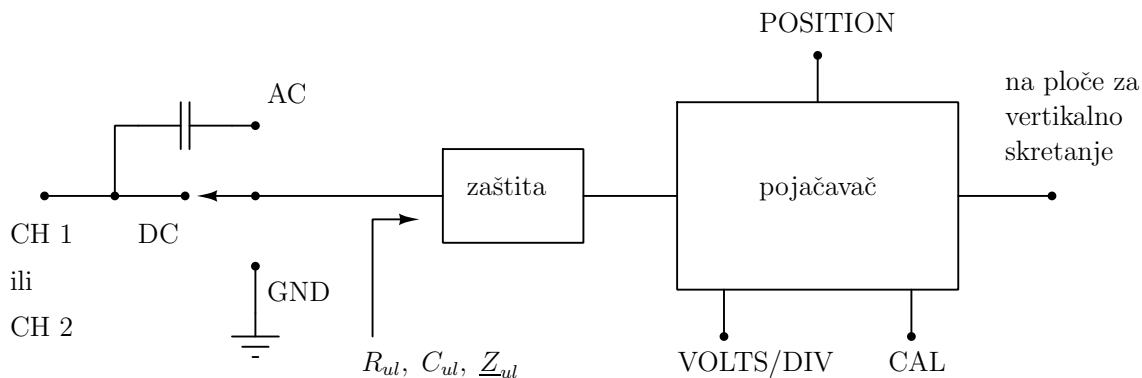
$$v(t) = V + \hat{v}(t). \quad (2.17)$$

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 $\hat{}$ 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 niskofrekvencijskih 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 niskofrekvencijskim 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 zaštiti 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 primenjenom 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 potencijetrom 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 potencijetrom označenim sa POSITION ili \updownarrow POSITION. Osim navedenih mogućnosti, kod većine osciloskopa je moguće smanjiti propusni opseg pojačavača kako bi se smanjio šum pri posmatranju niskofrekvencijskih 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) uključanjem prekidača INVERT.

Ulazni 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 direktne, 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 posmatranim vremenskim dijagramima i zanemarivanje ove činjenice je čest izvor grešaka. U jednom periodu (2000-tih godina) su bile popularne sonde sa preklopnikom kojim se prenosni odnos može izabrati da bude 1 : 1 ili 10 : 1, kakva je sonda prikazana na slici 3.1. Pri radu sa ovakvim 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 potencijometra 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 kalibrisanog 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 crtanja 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, priyatnije 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.

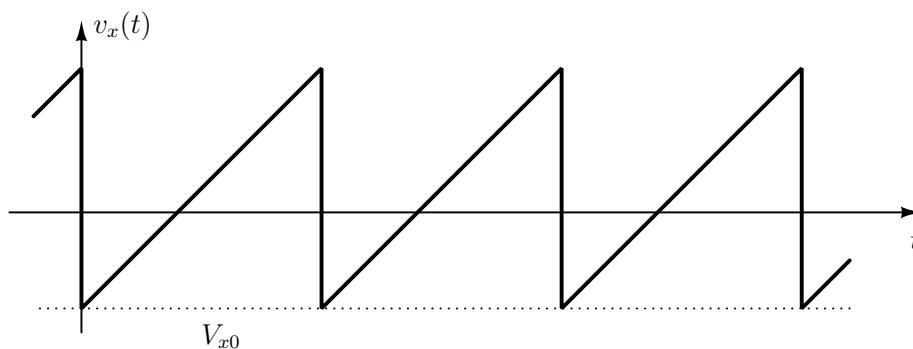
Kod digitalnih osciloskopa, zbog drugačijeg načina formiranja slike, ne postoje komande ekvivalentne položajima preklopnika ALT i CHOP. Funkcija pomenutog preklopnika u položaju ADD je proširena i obično se naziva MATH, kada je moguće prikazati rezultat različitih matematičkih operacija nad signalima 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

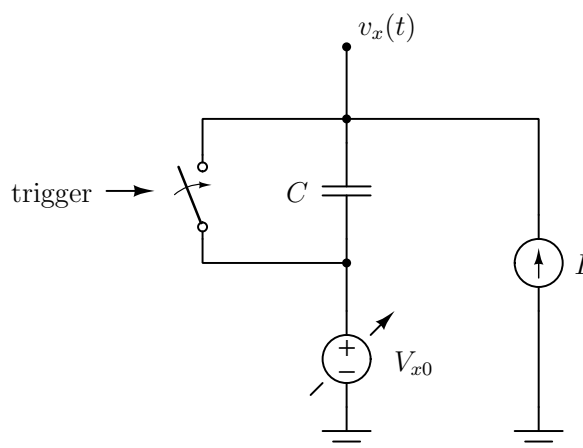
Na osciloskopu se najčešće posmatraju vremenski dijagrami periodičnih signala. Do sada je pokazano da je skretanje elektronskog mlaza u katodnoj cevi direktno proporcionalno naponu na pločama za skretanje. Ukoliko je ulazni signal doveden na ploče za vertikalno skretanje, položaj svetle tačke na y osi osciloskopa će indikovati vrednost posmatranog signala. Kako bi se dobio vremenski dijagram, horizontalna osa treba da bude građuisana po vremenu, odnosno duž horizontalne ose treba pomerati 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: Principijska šema generatora linearne vremenske baze.

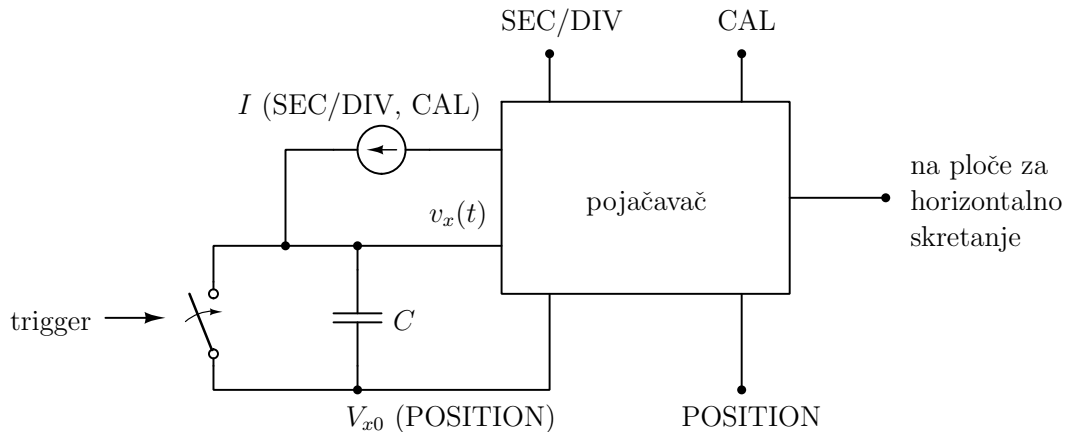
vremenski dijagram prikazan na slici 2.9. Tokom uspona napona v_x , elektronski mlaz se konstantnom brzinom kreće po ekranu sa leva na desno. Tokom kratkotrajnih silaznih ivica, elektronski snop se brzo vraća u krajnji levi položaj ekrana.

Kola za generisanje testerastog napona prikazanog na slici 2.9 se nazivaju generatori linearne vremenske baze. Principijska 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 sinhronizaciju 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 pojačanja 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 potencijometar 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 podelu vremenske ose između dva diskretna položaja preklopnika za podešavanje podele vremenske ose. To se postiže izvođenjem potencijometra sa crvenim dugmetom, označenim sa CAL, iz kalibrisanog (krajnjeg desnog) položaja. Okretanjem tog potencijometra kontinualno se može menjati podela vremenske ose. Podela vremenske ose označena na preklopniku SEC/DIV važi samo ako je potencijometar 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 diskretne 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 potencijometar 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

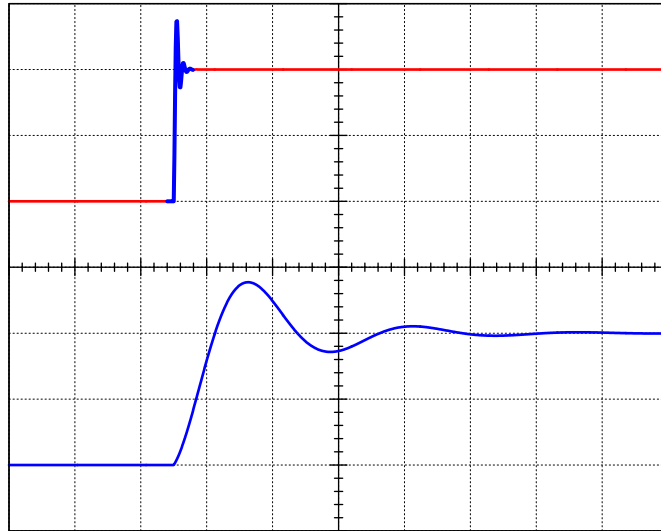


Slika 2.12: Komande za kontrolu vremenske baze osciloskopa.

ne vidi).

Kako je nagovešteno, jedna od specifičnosti osciloskopa Tektronix 2215A jeste postojanje dva sistema za horizontalno skretanje mlaza. Drugi sistem je pomoćni (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, pomoću 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. Potencijometrom 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 potencijometra 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. Potencijometar 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



Slika 2.13: Posmatranje detalja vremenskog dijagrama primenom pomoćnog sistema za horizontalno skretanje mlaza.

može, na konkretnom primeru osciloskopa, podešavati u opsegu od 0.5 do 10 podeoka vremenske ose. Ako se preklopnik HORIZONTAL MODE nalazi u položaju ALT, deo krive koju iscrtava osnovni sistem za horizontalno skretanje, a prikazuje ga pomoćni sistem, je pojačanog intenziteta, “highlighted” (ili u laboratorijskom slengu „hajlajtovan“), što je ilustrovano plavim delom na crvenoj krivoj na slici 2.13.

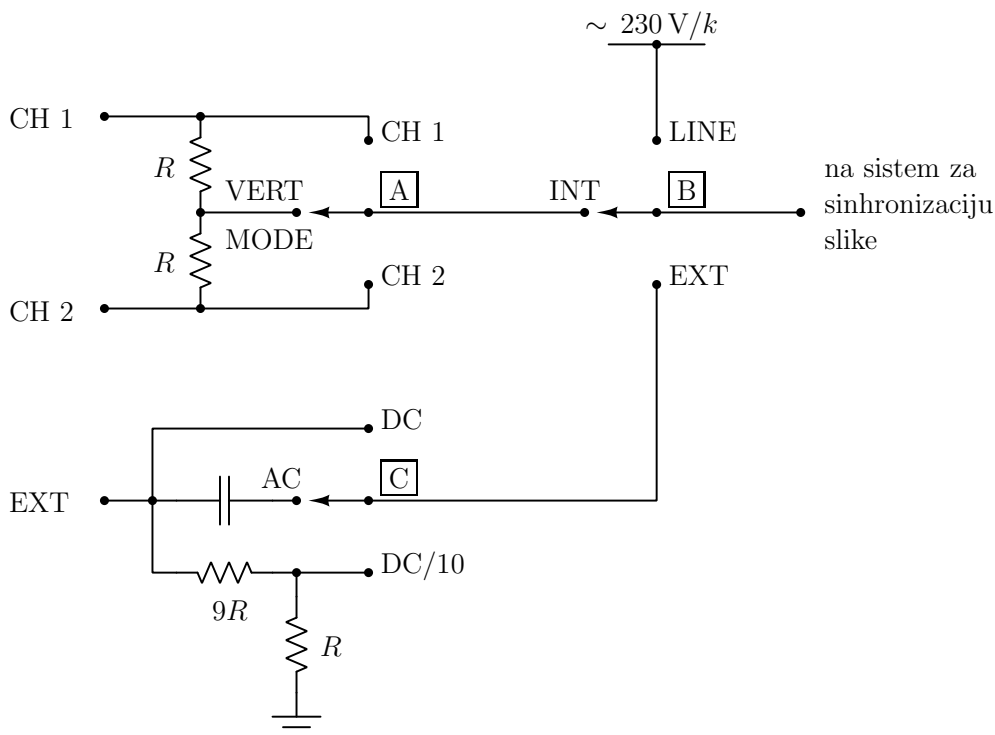
Krajnji levi položaj preklopnika za podešavanje podele vremenske ose, označen sa X–Y (ispisano na crnoj podlozi, delimično zaklonjeno), odgovara levom položaju preklopnika B sa blok šeme osciloskopa prikazane na slici 2.6. Time se kontrola horizontalnog skretanja elektronskog mlaza sa generatora linearne vremenske baze predaje pojačavaču kanala 1. Ova mogućnost se koristi kod posmatranja međusobne zavisnosti dva signala, kod merenja frekvencije i faznog stava primenom Lisažiovih figura, kod snimanja prenosnih karakteristika nelinearnih kola i kod snimanja karakteristike magnetenja feromagnetskih materijala.

Sistem za sinhronizaciju

Sistem za sinhronizaciju treba da obezbedi stabilnu sliku na osciloskopu prilikom posmatranja vremenskih dijagrama periodičnih signala. Sinhronizacija slike na osciloskopu obično predstavlja najveći problem u obučavanju u rukovanju osciloskopom.

Kako bi se na ekranu osciloskopa dobila stabilna slika pri posmatranju periodičnog signala, u svakom iscrtavanju slike elektronski mlaz treba da iscrtavanje vrši na istom mestu. Da bi se to ostvarilo, frekvencija posmatranog signala mora biti celobrojni umožak frekvencije generatora linearne vremenske baze. Ispunjavanje ovog uslova obezbeđuje blok za sinhronizaciju koji na generator linearne vremenske baze deluje davanjem signala za uključenje prekidača za pražnjenje kondenzatora.

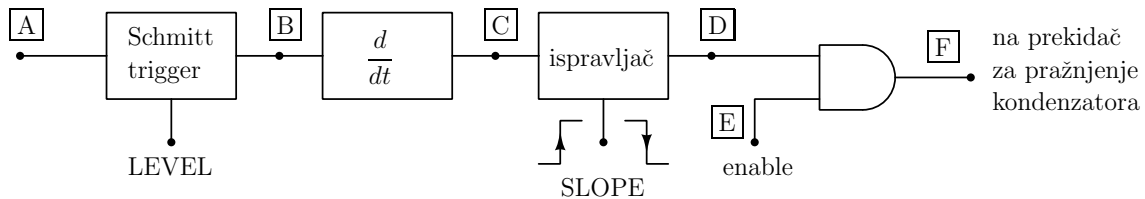
Prvi korak u sinhronizaciji slike jeste izbor sinhronizacionog signala. Principiska



Slika 2.14: Preklopnici za izbor sinhronizacionog signala.

šema kola za izbor sinhronizacionog signala je prikazana na slici 2.14. Preklopnik označen slovom **A** na slici 2.14 vrši selekciju mogućih sinhronizacionih signala baziranih na ulaznim signalima na kanalu 1 i kanalu 2. Mogući položaji tog preklopnika su CH 1, kada je izvor sinhronizacionog signala signal priključen na kanal 1 osciloskopa, CH 2, kada je izvor sinhronizacionog signala signal priključen na kanal 2, i treći položaj koji se često naziva VERT MODE (vertical mode). Položaj VERT MODE treba da obezbedi laku sinhronizaciju u slučajevima kada se često radi naizmenično sa kanalom 1 i kanalom 2, bez stalnog prebacivanja izvora sinhronizacionog signala na odgovarajući kanal. Položaj VERTICAL MODE za izvor sinhronizacionog signala u nekim slučajevima daje srednju vrednost signala prisutnih na kanalima 1 i 2, kako je prikazano na principskoj šemi sa slike 2.14. Moguće je i drugo rešenje, da za iscertavanje signala sa kanala 1 kanal 1 daje sinhronizacioni signal, dok za iscertavanje signala sa kanala 2 sinhronizacioni signal bude signal na kanalu 2. Izbor između ove dve mogućnosti je kod osciloskopa Tektronix 2215A uslovljen položajem preklopnika ALT-CHOP-ADD, gde položaju ALT odgovara naizmenično prebacivanje izvora sinhronizacionog signala na kanal koji se u tom prolazu iscertava. Ovo ima veoma značajne posledice kod merenja faze, o čemu će biti reči u odeljku 4.11. Kod digitalnih osciloskopa opcija VERTICAL MODE za izbor sinhronizacionog signala je najčešće izostavljena.

Preklopnik označen slovom **B** na slici 2.14 ima tri položaja: LINE, INT (internal) i EXT (external). U položaju LINE signal koji se dovodi na ulaz sinhronizacionog sistema je skaliran mrežni napon. Ovaj izvor sinhronizacionog signala je dobar kada se posmatraju procesi koji su vezani za mrežu, kod analize rada ispravljača i sistema za napajanje kontrolisanih mrežom, fazno kontrolisanih konvertora.



Slika 2.15: Blok šema sistema za sinhronizaciju.

Kod digitalnih osciloskopa sa baterijskim napajanjem izvor sinhronizacionog signala LINE je izostavljen, pošto osciloskop nema direktan pristup mrežnom naponu. U položaju INT, izvor sinhronizacionog signala je određen položajem preklopnika A. U položaju EXT preklopnika B, izvor sinhronizacionog signala je spolja dovedeni signal obrađen u skladu sa položajem preklopnika C.

Preklopnik C kontroliše obradu koja se vrši na spolja dovedenom sinhronizacionom signalu pre njegovog dovođenja na sistem za sinhronizaciju. Mogući položaji su DC, kada se spolja dovedeni signal direktno vodi na sistem za sinhronizaciju, AC, kada se spoljnji signal preko rednog kondenzatora dovodi na sistem za sinhronizaciju, čime se uklanja jednosmerna komponenta tog signala i položaj DC/10, kada se spolja dovedeni signal oslabi 10 puta razdelnikom napona i dovede na ulaz sistema za sinhronizaciju slike. Savremeni generatori test signala obično imaju poseban izlaz na kome se nalazi signal za sinhronizaciju koji se može dovesti na EXT ulaz sinhronizacionog signala osciloskopa. Na taj način se obezbeđuje jak i stabilan sinhronizacioni signal, nezavisan od posmatranih signala koji mogu biti male amplitude i/ili zagađeni šumom.

Najčešće se zadovoljavajuća sinhronizacija postiže položajem preklopnika A u poziciji VERT MODE i preklopnika B u INT. U slučaju posmatranja faznog stava dva signala treba proveriti tačno značenje položaja VERT MODE u uputstvu korišćenog osciloskopa, ili koristiti sinhronizaciju po CH 1 ili CH 2, kako će biti razmatrano u odeljku 4.11.

Na slici 2.15 je prikazana blok šema sistema za sinhronizaciju. Na ulaz sistema za sinhronizaciju u čvor označen slovom A je doveden signal sa sistema preklopnika za izbor sinhronizacionog signala. U prvoj obradi se od sinhronizacionog signala pravi povorka pravougaonih digitalnih impulsa. To se postiže primenom Šmitovog okidnog kola (Schmitt trigger). Na slici 2.16 su prikazani signali u sistemu sa sinhronizaciju slike. Na prvom dijagramu je predstavljen pretpostavljeni sinhronizacioni signal i nivo signala na osnovu koga okidno kolo formira pravougaone impulse (trigger level, LEVEL). Signal u čvoru označenom slovom B na šemi sa slike 2.15 je prikazan na drugom dijagramu na slici 2.16. Vidi se da je logička vrednost signala u tački B jednaka 1 kada je sinhronizacioni signal veći od zadatog nivoa, dok je jednaka 0 kada je sinhronizacioni signal manji od zadatog nivoa.

Povorka impulsa sa izlaza okidnog kola se dovodi na diferencijator koji od njih pravi uske impulse, kako je to prikazano na trećem dijagramu na slici 2.16. Kolo za diferenciranje se obično realizuje kao kolo za izdvajanje ivica signala, prikazano na

slici 2.17, koje ima funkciju prenosa

$$H_d(j\omega) = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} \quad (2.20)$$

što se u slučaju $\omega RC \ll 1$ svodi na

$$H_d(j\omega) \approx j\omega RC \quad (2.21)$$

što je funkcija prenosa idealnog diferencijatora. Kolo za izdvajanje ivica je u praksi čak i bolje rešenje od idealnog diferencijatora: veoma je jednostavno i ima ograničen izlazni napon kada se na ulaz dovode brzo promenljivi signali, izlaz ne teži Dirakovom impulsu kada je na ulazu Hevisajdova funkcija, već je ograničen.

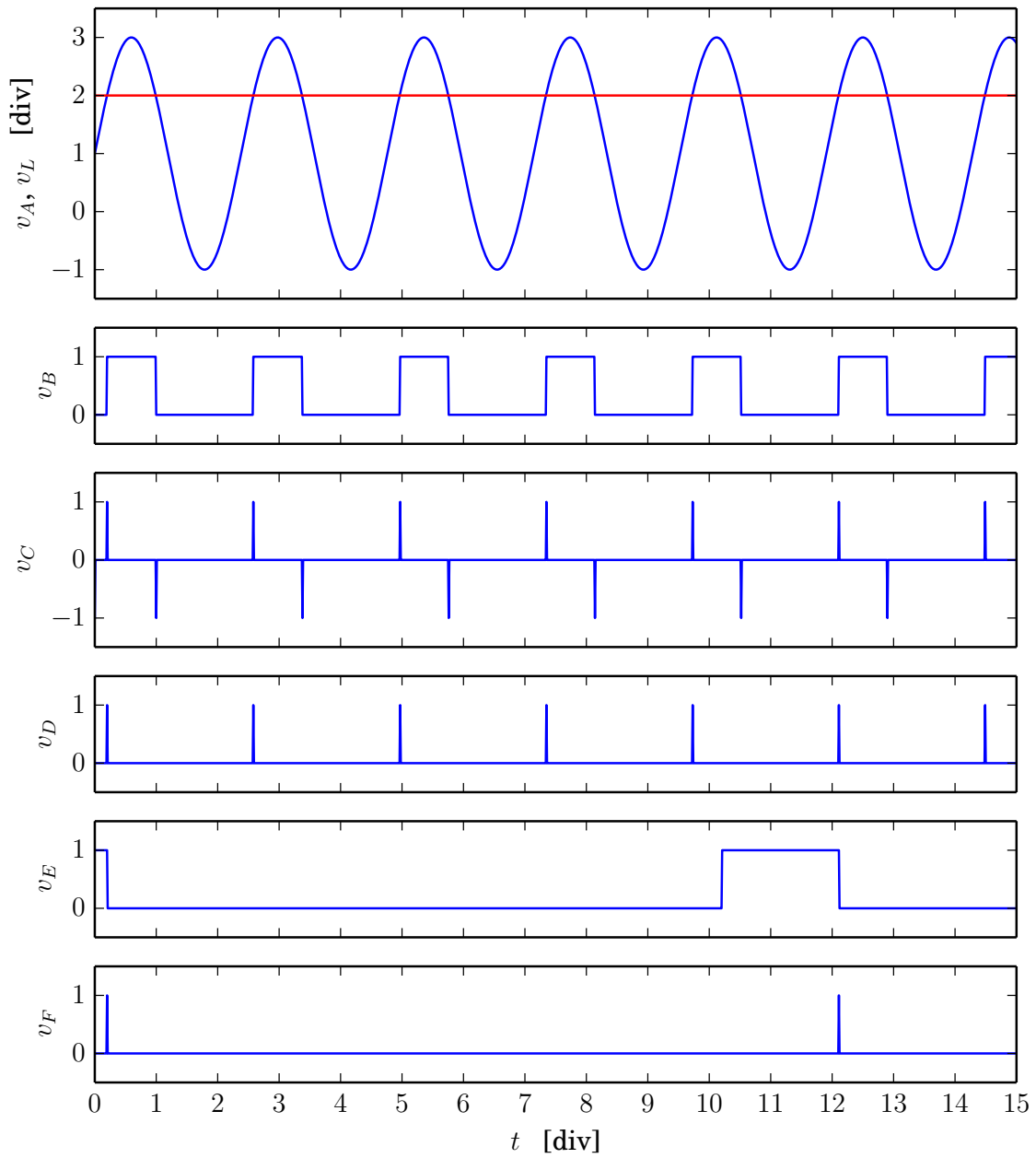
Signali se iz diferencijatora vode na blok za ispravljanje i selekciju impulsa. Na izlasku iz tog bloka se nalazi ili povorka pozitivnih impulsa iz diferencijatora (uklonjeni negativni impulsi) ili povorka ispravljenih negativnih impulsa (negativnim impulsima promenjen znak, pozitivni impulsi sa ulaza uklonjeni). Blok za selekciju i ispravljanje impulsa ima kontrolni preklopnik kojim se bira sinhronizacija na uzlazne ili silazne ivice impulsa. Taj preklopnik se obično označava sa SLOPE.

Kako bi na ekranu osciloskopa bilo moguće prikazati više od jedne periode sinhronizacionog signala, uvedeno je logičko I kolo koje propušta impulse iz bloka za selekciju i ispravljanje samo pod uslovom da je elektronski snop prešao bar 10 podeoka, 10 div. Na taj način se iscertavanje slike vraća na početak tek kada je iscertan ceo ekran. Na slici 2.16 je na petom dijagramu prikazan enable signal na ulazu logičkog I kola koji postaje jednak 1 tek kada elektronski snop pređe ceo ekran. Kada se posle skoka enable signala na 1 pojavi sinhronizacioni impuls, on uzrokuje vraćanje elektronskog mlaza u krajnji levi položaj, početak novog iscertavanja slike i obaranje enable signala na 0, dok elektronski snop ponovo ne pređe ceo ekran.

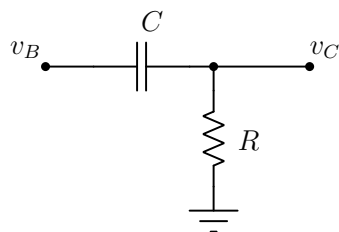
Trenutak povratka na početak novog iscertavanja slike je određen uključivanjem prekidača koji prazni kondenzator u generatoru linearne vremenske baze i vraća napon v_x na V_{x0} . Signal za uključivanje prekidača se dobija na izlazu kola za sinhronizaciju slike, čime se ceo krug stvaranja slike na osciloskopu zatvara.

U cilju ilustracije rada opisanog sistema, na slici 2.18 su prikazani signali na pločama za horizontalno i vertikalno skretanje, v_X i v_Y , označeni u normalizovanim jedinicama div koje odgovaraju podeoku na ekranu osciloskopa, u slučaju da je osnovni napon V_{x0} sistema za horizontalno skretanje postavljen na -5 div. Po-debljanim crvenim linijama su prikazani delovi dijagrama koji proizvode vidljiv deo slike na ekranu, dok su delovi dijagrama kada je elektronski mlaz izvan ekrana osciloskopa prikazani plavim linijama. Slika koju naponi v_X i v_Y sa slike 2.18 proizvode prikazana je na slici 2.19.

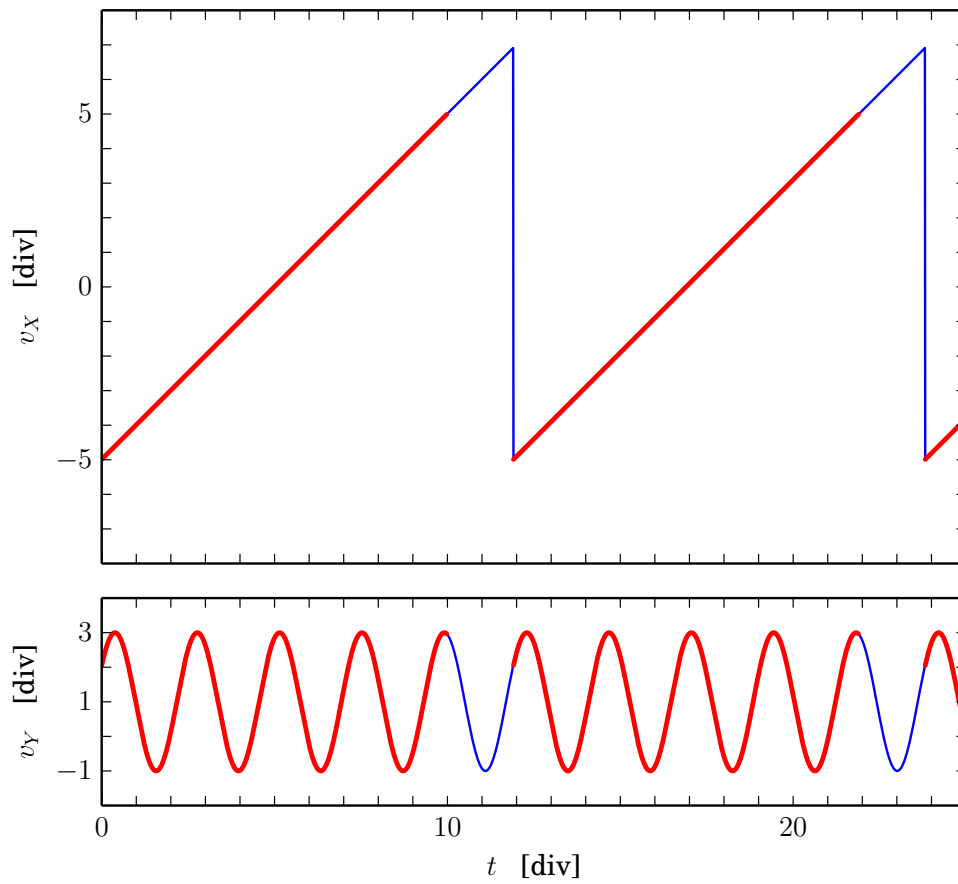
U slučaju da je osnovni napon V_{x0} sistema za horizontalno skretanje postavljen na -6 div, naponi v_X i v_Y su prikazani na slici 2.20, dok je rezultujuća slika koja se prikazuje na ekranu osciloskopa prikazana na slici 2.21. Za razliku od slučaja kada je bilo $V_{x0} = -5$ div, u ovom slučaju i sa leve i sa desne strane ekrana postoje „viškovi“ koji ne staju u ekran i ne iscertavaju se. Dijagrami sa slike 2.20 su prikazani u cilju ilustrovanja efekta pomeranja potencijometra za horizontalno pozicioniranje slike, \Leftarrow POSITION \Rightarrow , sa slike 2.12.



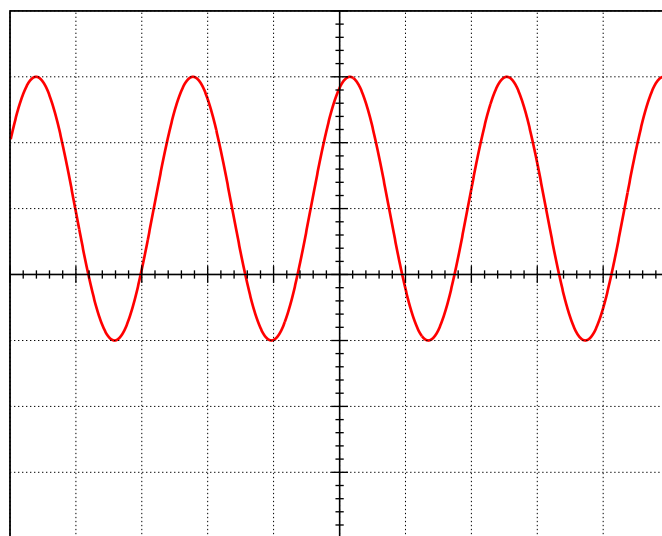
Slika 2.16: Signali u kolu za sinhronizaciju slike.



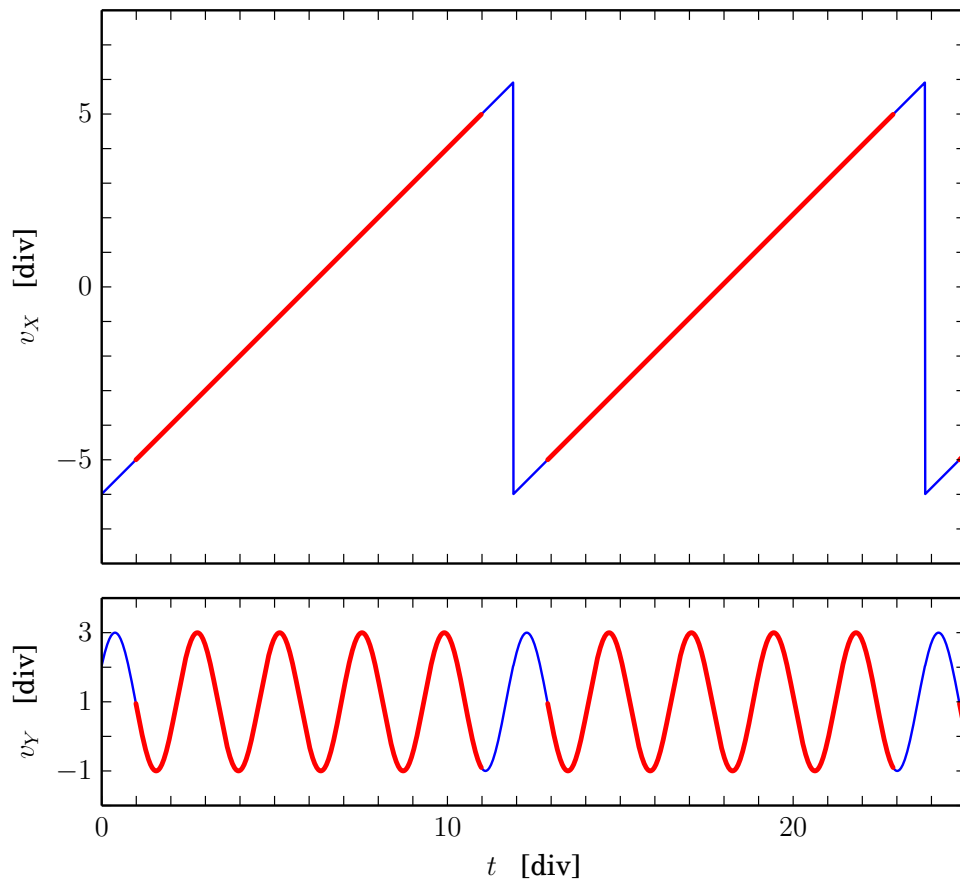
Slika 2.17: Kolo za približno diferenciranje, za izdvajanje ivica signala.



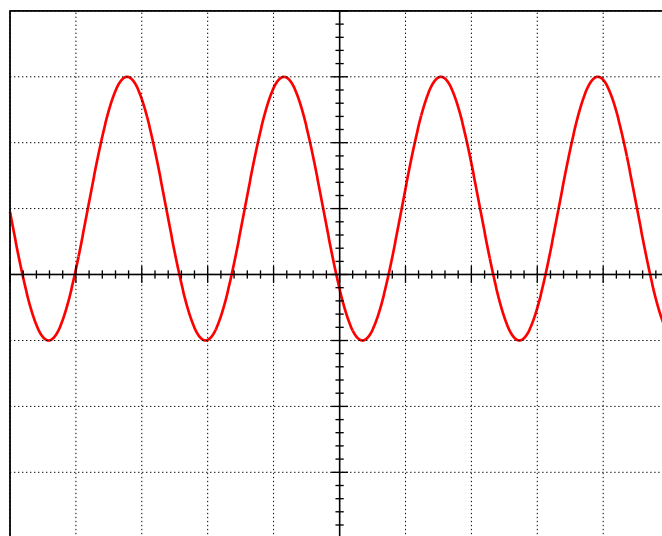
Slika 2.18: Vremenski dijagrami napona na pločama za skretanje elektronskog mlaza, $V_{x0} = -5$ div.



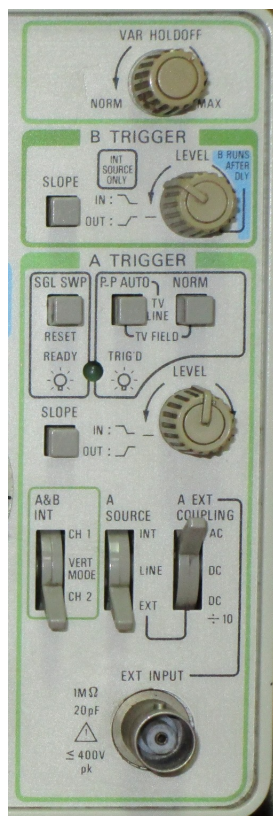
Slika 2.19: Sinhronizovana slika koju osciloskop prikazuje, $V_{x0} = -5$ div.



Slika 2.20: Vremenski dijagrami napona na pločama za skretanje elektronskog mlaza, $V_{x0} = -6$ div.



Slika 2.21: Sinhronizovana slika koju osciloskop prikazuje, $V_{x0} = -6$ div.



Slika 2.22: Komande za kontrolu sistema za sinhronizaciju.

Komande za kontrolu sistema za sinhronizaciju slike kod osciloskopa Tektronix 2215A su prikazane na slici 2.22, a slične su i kod bilo kog drugog osciloskopa. Sa A TRIGGER su označeni prekidači za kontrolu osnovnog sistema za sinhronizaciju. Ukoliko je uključen prekidač P-P AUTO (peak-to-peak automatic) aktivni sistem za sinhronizaciju je nešto složeniji od opisanog, pošto se opseg promene nivoa signala pri kome se sinhronizacija vrši automatski ograničava na opseg između minimalne i maksimalne vrednosti sinhronizacionog signala. Takođe, u slučaju da sinhronizacionog signala nema (ne postoji naizmenična komponenta signala dovoljne amplitude da bi se slika sinhronizovala) na ekranu će se pojaviti nesinhronizovana slika, pošto će komanda za pražnjenje kondenzatora u generatoru linearne vremenske baze biti automatski generisana, bez sinhronizacije. Ukoliko je uključen prekidač NORM, u slučaju da nema odgovarajućeg sinhronizacionog signala koji preseca nivo komparacije LEVEL, na ekranu neće biti prikazana nikakva slika i indikatorska svetleća dioda, označena sa TRIG'D na slici 2.22 neće svetleti. Osciloskop se najčešće koristi sa uključenim prekidačem P-P AUTO.

Taster SGL SWP RESET (single sweep reset) se koristi za posmatranje aperi-odičnih signala kada je potrebno prikazati vremenski dijagram signala samo jednim prolazom elektronskog mlaza po ekranu osciloskopa. Ukoliko su P-P AUTO i NORM isključeni, po pritisku tastera SGL SWP RESET se aktivira iscrtavanje jedne slike na ekranu. Nova slika neće biti iscrtana sve dok se ponovo ne pritisne SGL SWP RESET taster. Na ovaj način se ostvaruje ručna sinhronizacija, precizna i brza koliko i ruka operatera osciloskopa.

Već pomenuta svetleća dioda (LED) svetli u slučaju da je uspešno izvršena sinhronizacija, tj. u slučaju da je prisutan sinhronizacioni signal sa naizmeničnom komponentom dovoljne amplitude. To još uvek ne znači da je slika na osciloskopu stabilna: moguće je da je sinhronizacija izvršena na mrežni napon, sinhronizacioni signal postoji, dioda svetli, ali u slučaju da posmatrani signali sami po sebi nisu sinhronizovani sa mrežom na ekranu se neće pojaviti stabilna slika, već će slika „bežati“.

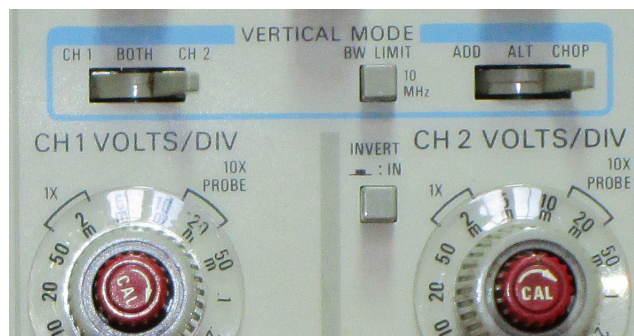
Sa LEVEL (trigger level) je označen potenciometar za kontrolu nivoa signala pri kome se vrši promena stanja na izlazu Šmitovog okidnog kola u sistemu za sinhronizaciju slike. Pri uključenom prekidaču P-P AUTO ona može da se kreće u rasponu od minimalne do maksimalne vrednosti sinhronizacionog signala, pa se njenim podešavanjem uglavnom utiče na fazni stav prikazivanja signala. Ukoliko je uključen prekidač NORM, automatsko podešavanje opsega u kome se može kretati referentni nivo okidnog kola je isključeno, i opseg promene nivoa signala pri kome se sinhronizacija vrši odgovara dopuštenom opsegu ulaznog napona Šmitovog okidnog kola, što se koristi kada je potrebno „uloviti“ aperiodične ili subharmonijske pojave, poput indukovanih smetnji. Ukoliko sinhronizacioni signal ne preseca nivo specificiran potenciometrom LEVEL, na ekranu se neće iscrtavati slika, pa je ispravno podešavanje nivoa sinhronizacionog signala od velike važnosti u ovom slučaju.

Prekidač označen sa SLOPE utiče na rad bloka za selekciju i ispravljanje signala iz diferencijatora. Njegova dva položaja odgovaraju sinhronizaciji na uzlaznu i sinhronizaciji na silaznu ivicu signala iz okidnog kola.

Preklopnik označen sa A TRIGGER na slici 2.22 vrši selekciju tipa sinhronizacionog signala i odgovara preklopniku B na šemi sa slike 2.14. Preklopnik A&B INT odgovara preklopniku A u šemi sa slike 2.14 i vrši izbor sinhronizacionog signala ukoliko je A TRIGGER u položaju INT. Preklopnik A EXT COUPLING (A external coupling) odgovara preklopniku C sa slike 2.14 i vrši selekciju obrade spoljnog sinhronizacionog signala pre dovođenja na sistem za sinhronizaciju slike. Sa EXT INPUT (external input) je označen konektor za priključivanje spoljašnjeg sinhronizacionog signala.

Potenciometar označen sa LEVEL u grupi komandi označenoj sa B TRIGGER podešava nivo za promenu stanja okidnog kola u sinhronizacionom sistemu pomoćnog sistema za horizontalno skretanje mlaza (B trigger). Ukoliko je taj potenciometar u krajnjem desnom položaju (okrenut do kraja u smeru kazaljke na satu), pomoćni sistem za horizontalno skretanje počinje sa iscrtavanjem slike nakon kašnjenja koje je specificirano potenciometrom za kontrolu kašnjenja pomoćnog sistema za horizontalno skretanje, označenog sa B DELAY TIME POSITION na slici 2.12.

Potenciometar označen sa VAR HOLDOFF na slici 2.22 služi sa podešavanje vremena koje protekne između dva iscrtavanja slike na ekranu osciloskopa, a tokom koga se iscrtavanje slike ne vrši (holdoff time). Normalan položaj je krajnji levi. Povećavanje ovog vremena ponekad olakšava formiranje stabilne slike prilikom posmatranja složenih digitalnih signala.



Slika 2.23: Komande za kontrolu prikazivanja po vertikalnoj osi.

Prikazivanje dva signala na ekranu osciloskopa sa jednim elektronskim mlazom

Problem prikazivanja dva signala na ekranu osciloskopa koji koristi katodnu cev sa jednim elektronskim mlazom je vezan isključivo za analogne osciloskope. Tipične komande za kontrolu prikazivanja dva signala su prikazane na slici 2.23 i sastoje se iz dva preklopnika u grupi komandi označenih sa **VERTICAL MODE**: preklopnika sa položajima **CH 1**, **BOTH** i **CH 2** i preklopnika sa položajima **ADD**, **ALT** i **CHOP**, kao i prekidača kojim se uključuje filter ulaznog signala, **BW LIMIT**. Ovim komandama se u analizi primene osciloskopa, u skladu sa funkcijom koju vrši, često pridružuje i prekidač **INVERT**, takođe prikazan na slici 2.23, kojim je moguće invertovati signal drugog kanala, što je ekvivalentno množenju signala sa -1 .

Prvopomenuti preklopnik, sa položajima **CH 1**, **BOTH** i **CH 2**, određuje koji će signal biti prikazan na ekranu osciloskopa: prvi (**CH 1**), oba (**BOTH**), ili drugi (**CH 2**). Ukoliko se ovaj preklopnik nalazi u položaju **BOTH**, tada drugopomenuti preklopnik određuje način prikazivanja dva signala na ekranu. Ako je taj preklopnik u položaju **ADD**, na ekranu će se biti prikazan zbir signala sa **CH 1** i **CH 2**, $v_{CH1} + v_{CH2}$. Ukoliko je i prekidač **INVERT** u aktivnom položaju, na ekranu će biti prikazana razlika signala sa **CH 1** i **CH 2**, $v_{CH1} - v_{CH2}$. O položaju ovog prekidača je potrebno voditi računa, pošto se događa da ostane zaboravljen u aktivnom položaju i da korisnik posmatra invertovan signal na kanalu 2 bez želje da to čini. Ukoliko je preklopnik u položaju **ALT**, na ekranu će naizmenično biti iscertavani signali sa kanala 1 i kanala 2 tako što se u jednom prelazu elektronskog mlaza preko ekrana osciloskopa iscertava jedan od kanala. Korisnik osciloskopa će usled perzistencije slike videti dve krive na ekranu, pod pretpostavkom da je frekvencija dovoljno visoka, što je već za frekvencije preko 100 Hz zadovoljeno. Ukoliko je izvor sinhronizacionog signala podešen na **VERT MODE**, u položaju **ALT** preklopnika za izbor načina prikazivanja sinhronizacija se vrši prema kanalu koji se trenutno iscertava, odnosno kanal koji se trenutno iscertava je izvor sinhronizacionog signala. Pošto je svaki od posmatranih signala sam sebi izvor sinhronizacionog signala, informacija o razlici faze posmatranih signala se gubi, pa ukoliko je ona od značaja nikako ne treba posmatrati signale sa sinhronizacijom u **VERT MODE** i načinom prikazivanja **ALT**. Način prikazivanja **ALT** je dobar za signale sa frekvencijom većom od oko 1 kHz, dok za signale sa nižim frekvencijama dovodi do treperenja slike, što je zamorno i neprijatno za posmatrača. U takvim

slučajevima je povoljno koristiti način prikazivanja CHOP u kome elektronski mlaz preskače sa iscrtavanja jedne krive na iscrtavanje druge krive tokom samog iscrtavanja, pa su krive efektivno predstavljene kao isprekidane linije, što usled perzistencije mlaza i međusobne nesinhronizovanosti signala koji upravlja iscrtavanjem i samih signala koji se iscrtavaju stvara utisak kontinualne linije.

Prekidač BW LIMIT, kako je već rečeno, služi za uključivanje dodatnog filtra propusnika opsega koji u primeru sa slike 2.23 ograničava spektar posmatranih signala na 10 MHz. Ovo se koristi pri posmatranju signala u kojima su značajne spektralne komponente na niskim frekvencijama, pa ograničavanje spektra posmatranih signala redukuje prisustvo šuma.

Kako je već naglašeno, mogućnosti opisane u ovom odeljku su karakteristične za analogne osciloskope, ali nis opisanih funkcija je zastupljen i kod digitalnih osciloskopa. Preklopnik za izbor kanala koji se prikazuju (CH 1, BOTH, CH 2) je funkcionalno zastupljen kod digitalnih osciloskopa tako što za svaki kanal postoji opcija da signal bude ili ne bude prikazan. Opcija za ograničavanje spektra (BW LIMIT) se kod digitalnih osciloskopa obično može postaviti za svaki kanal nezavisno. Prikazivanje zbira ili razlike signala je kod digitalnih osciloskopa obično implementirano preko MATH menija gde se nude i druge opcije, poput proizvoda posmatranih signala, što omogućava posmatranje trenutne snage. Jedina opcija koja kod digitalnih osciloskopa nije implementirana je izbor načina prikazivanja signala između ADD i CHOP, pošto zbog drugačijeg načina formiranja slike na ekranu osciloskopa tako nešto nije potrebno.

Osvrt na digitalne osciloskope

Povećanje mogućnosti digitalnih komponenata i pad njihove cene uzrokovali su prodor digitalne tehnologije u sve oblasti elektronike, pa i u oblast električnih merenja. Razvoj digitalnih osciloskopa je išao u dva pravca, ka logičkim analizatorima namenjenim za posmatranja signala u složenim digitalnim sistemima, gde je od manjeg značaja tačno poznavanje trenutne vrednosti signala i veliki opseg mogućih vrednosti prikazanih signala (dovoljno je poznavanje logičke vrednosti signala, 0 ili 1), a od velikog značaja je mogućnost posmatranja velikog broja nezavisnih signala (svakako više od dva kanala koje obezbeđuju standardni analogni osciloskopi), kao i mogućnost praćenja signala tokom dužeg perioda vremena. Drugi pravac je išao ka savremenim digitalnim osciloskopima, koji se po komandama minimalno razlikuju od analognih osciloskopa i predstavljaju njihovu digitalnu implementaciju. Dodatne mogućnosti koje pružaju digitalni osciloskopi su pre svega mogućnost lake akvizicije i skladištenja rezultata merenja, kao i niz automatizovanih merenja koja su zasnovana na digitalnoj obradi signala. Najčešće je moguće sa digitalnog osciloskopa preneti rezultate merenja u obliku datoteke sa nizom odbiraka na personalni računar, gde je moguća njihova dalja digitalna obrada i jednostavno arhiviranje. Digitalni osciloskopi najčešće mogu da automatski vrše merenje srednje vrednosti posmatranog signala, efektivne vrednosti, amplitude, minimalne i maksimalne vrednosti, periode i trajanja uzlazne i silazne ivice digitalnih impulsa. U ovim slučajevima valja povremeno grubo proveriti rezultat merenja, pošto se zbog prisustva šuma i/ili smetnji može dogoditi da algoritam za određivanje periode i frekvencije ne podrazumeva pod

periodom signala isto što i korisnik, a slični efekti se mogu uočiti i kod algoritama za druga merenja.

Takođe, savremeni digitalni osciloskopi gotovo potpuno napuštaju koncept katodne cevi i sliku prikazuju na displeju sa tečnim kristalima, često sa mogućnošću prikazivanja dijagrama u boji. To omogućava bitno smanjenje dimenzija i težine osciloskopa, uz istovremeno povećanje ekrana i njegove čitljivosti.

Bez obzira na dodatne mogućnosti, osnovni koncepti su kod digitalnih osciloskopa identični kao i kod analognih. Rukovanje digitalnim osciloskopima je gotovo identično rukovanju analognim. Nove mogućnosti su obično jako dobro dokumentovane, intuitivne i lako se koriste. Kvalitativna prednost koju digitalni osciloskopi pružaju je sprega sa računarom i umrežavanje, čime je omogućeno povezivanje osciloskopa u automatizovane merne sisteme.

Sonde za osciloskope

Naponske sonde

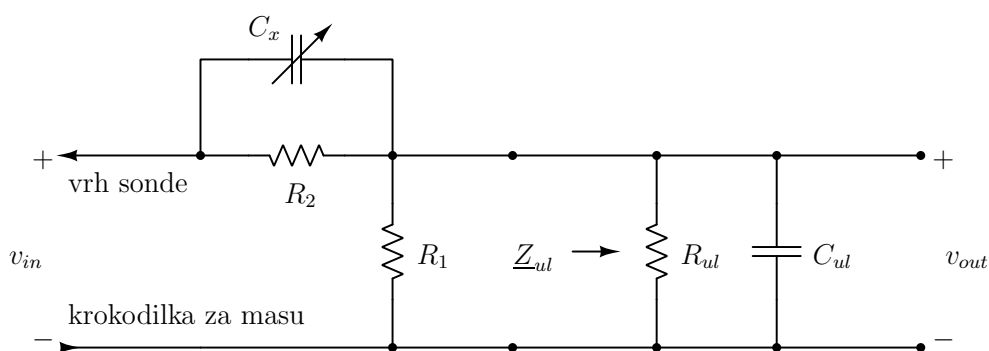
Sonda osciloskopa treba da obezbedi lak pristup signalu koji se posmatra, a često i slabljenje tog signala kako bi se prilagodio dozvoljenom opsegu ulaznih napona osciloskopa. Najčešće se sreću sonde sa slabljenjem od 10 puta, znatno ređe sonde sa slabljenjem od 100 puta, mada postoje i sonde sa većim slabljenjima. Lak pristup signalu podrazumeva da sonda ima dobar kontakt (da ne prekida pri pomeranju), da ima hvataljku („krokodilku“) za „masu“ (referentni potencijal) koja se lako može demontirati kada nije potrebna i da ima ispravan vrh („pipalicu“) kojim se dodiruje čvor čiji se potencijal posmatra, kao i ispravnu kuku kojom se mogu obuhvatiti neizolovane žice kako bi se ostvario kontakt. Mnoštvo mehaničkih delova koji treba da budu laki i fleksibilni, a istovremeno trajni i izdržljivi, uslovljava relativno složenu izradu i visoku cenu naponskih sonda. Stoga je velika verovatnoća da će studenti tokom izrade laboratorijskih vežbi koristiti improvizovane sonde.



Slika 3.1: Naponska sonda, 1 : 1 i 10 : 1, sa priključkom za masu.



Slika 3.2: Improvizovana naponska sonda 1 : 1 sa priključkom za masu, za laboratorijske vežbe.



Slika 3.3: Sonda i ulazna impedansa osciloskopa.

Kompenzacija naponskih sonda

Naponske sonde sa slabljenjem (sonde čiji prenosni odnos nije 1 : 1) to slabljenje ostvaruju primenom razdelnika napona predstavljenom otpornicima R_1 i R_2 na slici 3.3. Sa druge strane, ulazna impedansa osciloskopa \underline{Z}_{ul} se može predstaviti paralelnom vezom otpornika R_{ul} i kondenzatora C_{ul} . Tipične vrednosti ulazne otpornosti su $R_{ul} \sim 1 \text{ M}\Omega$, a ulazne kapacitivnosti su $C_{ul} \sim 10 \text{ pF}$. Postojanje ulazne kapacitivnosti uslovljava frekvencijsku zavisnost sistema prenosa od izvora posmatranog signala do osciloskopa: posmatrani signali iste amplitude će na različitim frekvencijama na ulazu osciloskopa proizvoditi signale različitih amplituda. Ovo dovodi do izobličenja složenoperiodičnih signala, do promene njihovog oblika, što je svakako nepoželjno. Kako bi se ova pojava izbegla i uklonila zavisnost funkcije prenosa od frekvencije, u naponske sonde sa slabljenjem se uvodi trimmer kondenzator (kondenzator čija se kapacitivnost može podešavati) označen sa C_x na slici 3.3. Funkcija prenosa sistema sa slike 3.3 je

$$H(j\omega) = \frac{v_{out}(j\omega)}{v_{in}(j\omega)} = \frac{\frac{R_{1ul}}{1+j\omega R_{1ul} C_{ul}}}{\frac{R_{1ul}}{1+j\omega R_{1ul} C_{ul}} + \frac{R_2}{1+j\omega R_2 C_x}} \quad (3.1)$$

gde je

$$R_{1ul} = R_1 \parallel R_{ul} = \frac{R_1 R_{ul}}{R_1 + R_{ul}}. \quad (3.2)$$

Ako je

$$1 + j\omega R_{1ul} C_{ul} = 1 + j\omega R_2 C_x \quad (3.3)$$

funkcija prenosa (3.1) prestaje da zavisi od frekvencije i svodi se na

$$H(j\omega) = \frac{v_{out}(j\omega)}{v_{in}(j\omega)} = \frac{R_{1ul}}{R_{1ul} + R_2} \quad (3.4)$$

što je i bio cilj kompenzacije. Uslov (3.3) se svodi na

$$R_{1ul} C_{ul} = R_2 C_x \quad (3.5)$$

pa je za kompenzaciju sonde potrebno eksperimentalno podesiti C_x na vrednost

$$C_x = C_{ul} \frac{R_{1ul}}{R_2}. \quad (3.6)$$

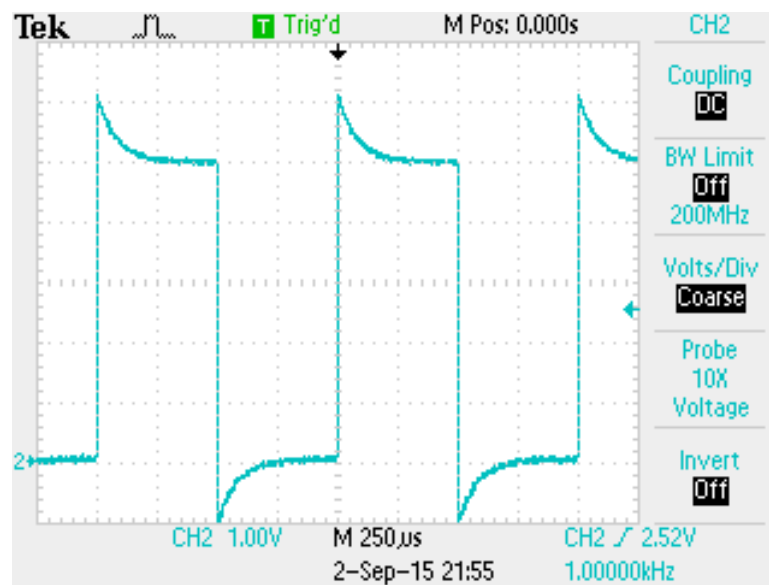
Tipične otpornosti otpornika u razdelniku su takve da je najčešće $R_1 \ll R_{ul}$, pa je prema (3.2) $R_{1ul} \approx R_1$ i funkcija prenosa sistema sonda—osciloskop se svodi na

$$H(j\omega) = \frac{v_{out}(j\omega)}{v_{in}(j\omega)} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad (3.7)$$

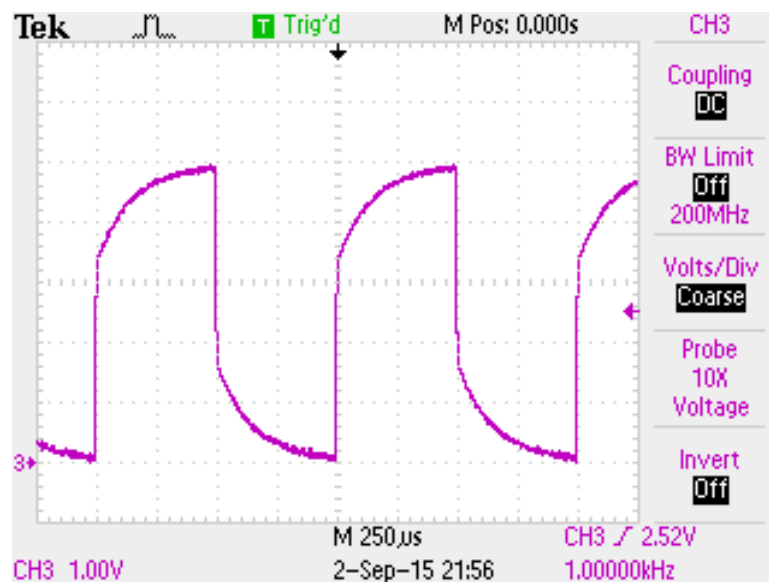
Kako se ulazna impedansa razlikuje od osciloskopa do osciloskopa, potrebno je izvršiti prilagođenje sonde na osciloskop. Prilagođenje se vrši podešavanjem kapacitivnosti promenljivog (trimer) kondenzatora C_x (slika 3.3) koji se nalazi u sondi. Ovo podešavanje se vrši tako što se sonda priključi na izvor pravougaonog test signala koji postoji na svakom osciloskopu. Gotovo uvek je frekvencija test signala 1 kHz, a amplituda se razlikuje u zavisnosti od modela osciloskopa i kreće se od 0.5V do 5 V. Na slici 2.5, pristup izvoru test signala je označen sa PROBE ADJUST. Ukoliko se na ekranu osciloskopa ne vidi povorka pravougaonih impulsa, potrebno je izvršiti podešavanje trimer kondenzatora C_x sve dok se pravougaoni signal ne dobije. Na slici 3.4 je prikazan vremenski dijagram test signala kada je sonda prekompenzovana (prevelika kapacitivnost C_x , na slici 3.5 je prikazan vremenski dijagram test signala kada je sonda podkompenzovana (premala kapacitivnost C_x), a na slici 3.6 je prikazan vremenski dijagram test signala kada je sonda ispravno kompenzovana.

U cilju poređenja signala koje različito kompenzovane sonde dovode do osciloskopa, ilustrovanja vizuelnog efekta faktora skaliranja naponske ose i prikaza mogućnosti digitalnih osciloskopa sa ekranom u boji, sva tri signala su istovremeno prikazana na slici 3.7. Kako bi signali stali na ekran, podela naponske ose je sa 1 V/div promenjena na 5 V/div, što je smanjilo prikazanu varijaciju signala po naponskoj osi, usled čega su efekti nekompenzovanih sonde manje uočljivi nego na slikama 3.4–3.6. Takođe, uočava se da se posmatrani signali veoma lako razlikuju i identifikuju zahvaljujući različitim bojama kojima su prikazani.

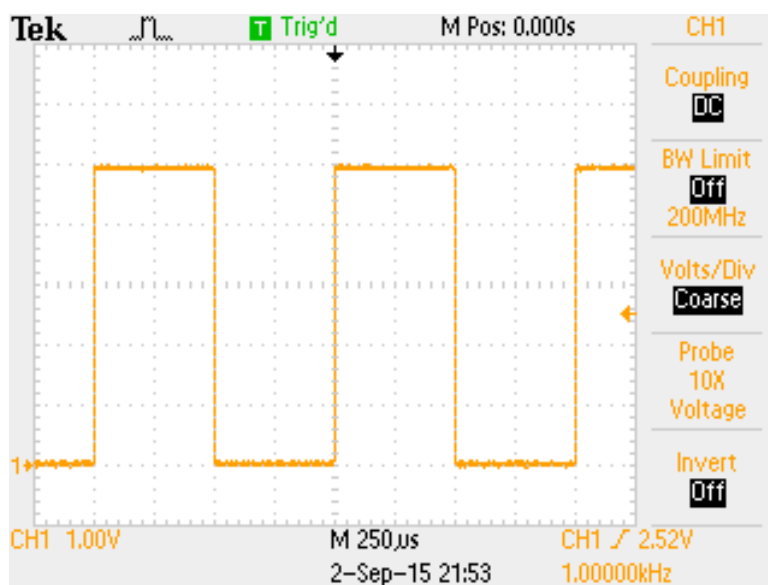
U svim razmatranjima koja slede, smatraćemo da je pre merenja izvršena kompenzacija sonde i nećemo se više na tu temu vraćati. U praksi je čest slučaj da se ne proverí da li je sonda kompenzovana, zbog čega svi rezultati dugotrajnih merenja mogu da budu pogrešni.



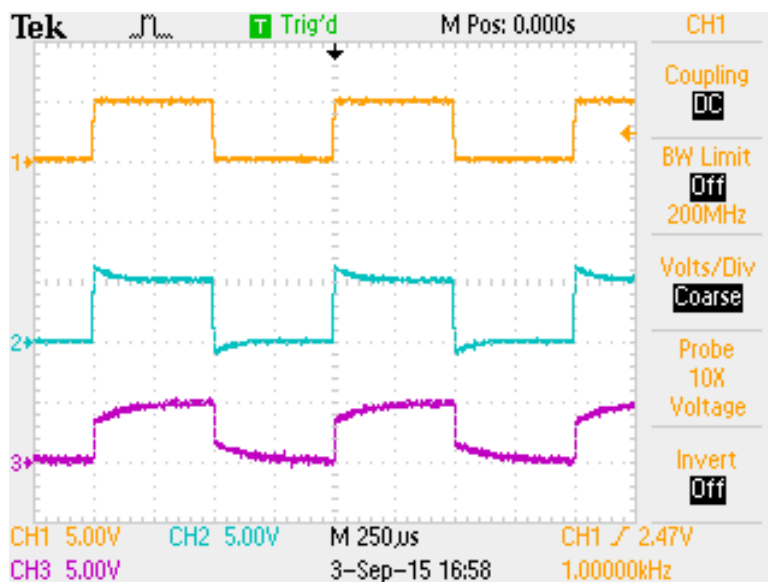
Slika 3.4: Prekompenzovana sonda.



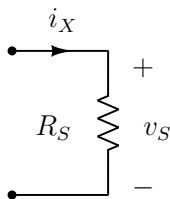
Slika 3.5: Podkompenzovana sonda.



Slika 3.6: Ispravno kompenzovana sonda.



Slika 3.7: Kompenzacija sonde, poredenje.



Slika 3.8: Šant.

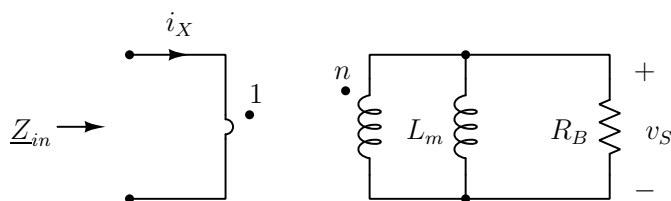
Strujne sonde

Neposredno, osciloskop služi za prikazivanje naponskih signala. Međutim, bilo koja fizička veličina koja se može primenom odgovarajućeg senzora pretvoriti u naponski signal se posredno može prikazati na ekranu osciloskopa. Obično se u ovom kontekstu kao prva veličina razmatra jačina električne struje.

Struju je moguće pretvoriti u naponski signal primenom šanta, prikazanog na slici 3.8. Ova tehnika je jeftina, jednostavna i ima dobru linearnost, ali ima i niz ozbiljnih nedostataka:

1. U posmatrano električno kolo je potrebno ugraditi šant. Ovo zahteva prekidanje grane kroz koju teče struja koja se meri i ugradnju novog elementa, otpornika, za šta je potrebno vreme i rad.
2. Ugradnja šanta utiče na kolo na kome se merenje vrši, na red sa granom čija se struja meri vezuje se otpornik R_S . Struja koja se meri će biti drugačija kada se šant ukloni. Ova razlika može biti značajna, pa je potrebno teorijski razmotriti problem i odabrati odgovarajuću otpornost šanta.
3. Na šantu se disipira snaga. Potrebno je odabrati šant koji može da izdrži disipiranu snagu, a ta snaga treba da bude zanemarljiva u odnosu na ostale snage u kolu, kako bi uticaj umetanja šanta bio mali.
4. Postoji galvanska (provodna) veza između kola i osciloskopa, pa stoga treba voditi računa o mogućim problemima sa uzemljenjem (masama), o čemu će biti više reči u poglavlju 5.

Iz navedenih razloga, merenje šantom je zahtevno i nepopularno, a povoljno je ako se merenje vrši često na malom broju fiksnih test tačaka, gde se šant ugradi i tu ostavi dok se ne završi kompletna serija merenja.



Slika 3.9: Strujni transformator.

Ako je potrebno često menjati grane kola kroz koje se struja meri i minimizovati uticaj senzora na kolo koje se posmatra, povoljno je iskoristiti magnetsko polje koje stvara struja koja se meri i preko njega odrediti struju. Ovo je moguće ostvariti na više načina, a najviše se za tu namenu koriste strujni transformatori. Strujni transformator je transformator čije ponašanje određuju isti fizički procesi i opisuju ga iste jednačine kao i bilo koji drugi transformator. Specifičnost je samo ta što primar strujnog transformatora čini provodnik grane kroz koju struja koja se meri teče, a na sekundaru se merenje struje vrši. Ako je na raspolaganju odgovarajuća mehanička konstrukcija, takozvana „strujna klešta“, strujni transformator se formira tako što se rasklopivom feromagnetskom konstrukcijom samo obuhvati provodnik grane u kojoj se struja meri. Prividno, na ovaj način se kolo na kome se merenje vrši ne modifikuje. Međutim, u provodniku obuhvaćenom magnetskim poljem strujnog transformatora (strujnih klešta) se indukuje elektromotorna sila, u skladu sa ekvivalentnom šemom prikazanom na slici 3.9, gde je sa L_m označena magnetizaciona inuktivnost strujnog transformatora, a sa Z_{in} ulazna impedansa koja je efektivno dodata na red grani čija se struja meri. Ova pojava nije očigledna, kao kod ugradnje šanta, ali je ne treba zaboraviti. Ulazna impedansa strujnog transformatora je

$$\underline{Z}_{in} = \frac{1}{n^2} \frac{j\omega L_m R_B}{j\omega L_m + R_B} \quad (3.8)$$

pa se zbog toga za vrednost n obično biraju veliki brojevi, reda 1000. Ovo za rezultat daje jako malu ulaznu impedansu, što je i bio cilj, ali i jako veliku magnetizacionu inuktivnost ($L_m = A_L n^2$), što je dodatna pogodnost. Stoga se za dovoljno veliku frekvenciju signala (upravo će pojam „dovoljno velika“ praviti probleme za merenje jednosmerne struje) može smatrati $\omega L_m \gg R_B$, pa je

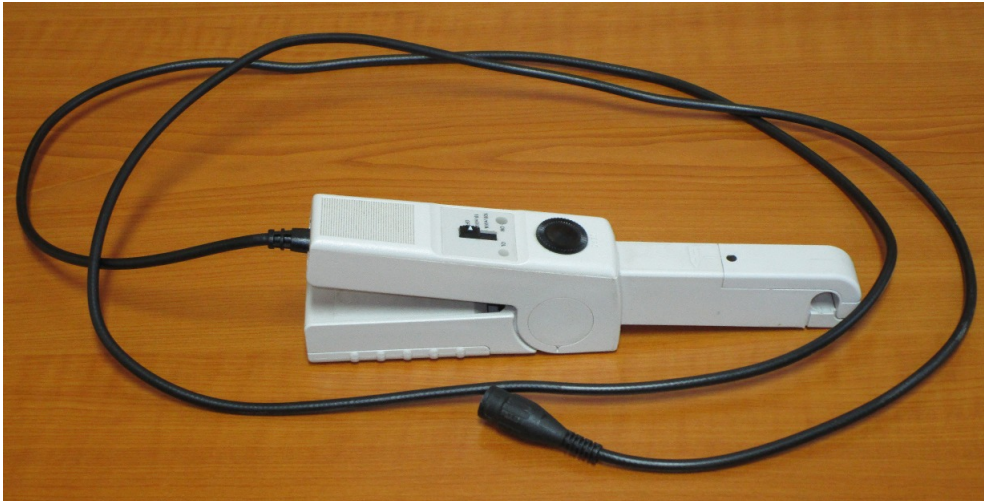
$$\underline{Z}_{in} \approx \frac{1}{n^2} R_B. \quad (3.9)$$

Analizom kola u koje je umesto šanta umetnut strujni transformator, može se zaključiti da su pri istom naponu na izlazu senzora gubici koje sensor unosi (disipacija na senzoru) u slučaju primene strujnog transformatora n puta manji nego u slučaju da se koristi šant, gde je n prenosni odnos (najčešće jednak broju navojaka sekundara, jedan navojak na primaru) strujnog transformatora. Pošto je n tipično reda veličine 10^3 , strujni transformatori znatno smanjuju uticaj senzora na kolo u kome se merenje struje vrši.

Da bi strujni transformator bio pogodan za primenu na različitim mestima u kolu, odnosno da bi se lako prebacivao sa mesta na mesto, proizvođači obično posebnu pažnju posvete mehaničkoj konstrukciji kako bi napravili rasklopivo jezgro kojim se jednostavno obuhvati provodnik u kome se meri struja. Kako je već pomenuto, ovakva strujna sonda se često u laboratorijama naziva „strujna klešta“.

Mana strujnih transformatora je nemogućnost merenja jednosmerne struje (odnosno jednosmerne komponente kod složenoperiodične struje), pošto za $\omega \rightarrow 0$ magnetizaciona inuktivnost L_m predstavlja kratak spoj, pa funkcija prenosa senzora

$$H_S(j\omega) = \frac{v_S(j\omega)}{i_X(j\omega)} = \frac{1}{n} \frac{j\omega L_m R_B}{j\omega L_m + R_B} \quad (3.10)$$



Slika 3.10: Strujna sonda.

ne propušta niskofrekvencijske komponente u spektru posmatrane struje. Rešenje za ovaj problem je primena kompenzovanih Holovih senzora, koji predstavljaju spoj Holovog senzora i strujnog transformatora kojim se izravnavaju frekvencijska karakteristika u okolini jednosmerne komponente i omogućava posmatranje i jednosmerne i naizmenične komponente signala. Analiza ovakvih sistema prevazilazi obim predmeta, ali treba imati u vidu da se na tom principu zasnivaju sve strujne sonde za posmatranje signala od jednosmerne komponente do neke granične frekvencije, zavisne od samog senzora. Na slici 3.10 je prikazana jedna strujna sonda tog tipa, koja se u nastavi koristi na laboratorijskim vežbama iz Energetske elektronike 2, [6]. Ova sonda ima propusni opseg reda 100 kHz i može da meri struju do 100 A. Za širi frekvencijski opseg se koriste sonde sa izdvojenim pojačavačem, poput sonde prikazane na slici 3.11, čiji pojačavač ima propusni opseg do 100 MHz.



Slika 3.11: Strujna sonda sa širokim propusnim opsegom.

Merenja pomoću osciloskopa

Osciloskop je prvenstveno instrument za posmatranje signala i ne spada u najpreciznije merne instrumente. Greška merenja vremenskih intervala i napona primenom analognog osciloskopa je tipično reda 2% i više. I pored toga, osciloskop se veoma često koristi za niz merenja. Popularnost osciloskopa kao mernog instrumenta leži u nizu veoma raznovrsnih merenja koja se njime mogu vršiti, kao i u izuzetnoj vizuelizaciji fizičkog procesa koju osciloskop omogućava.

Graduacija ekrana

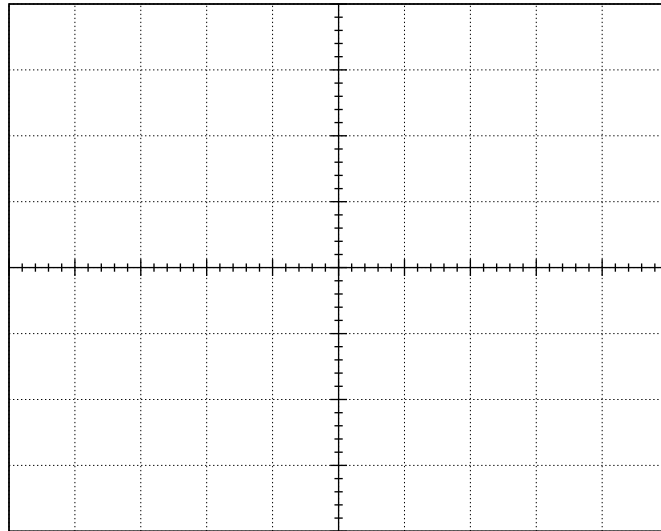
Tipičan ekran osciloskopa, diskutovan u poglavlju koje je obrađivalo katodnu cev i prikazan na slici 2.5 je graduisan kako je prikazano na slici 4.1. Graduacija je ucrtana na ekran osciloskopa sa unutrašnje strane, kako bi se izbegla greška usled paralakse. Merenja pomoću osciloskopa se svode na očitavanja rastojanja na slici formiranoj na ekranu osciloskopa. Osnovna jedinica rastojanja na ekranu jeste podeok (division, skraćeno div). Visina ekrana osciloskopa je tipično 8 podeoka, a širina 10 podeoka. Dve centralne linije su dodatno izgraduisane na rastojanja od po 0.2 podeoka.

Kod nekih analognih osciloskopa, za merenje trajanja usponske i silazne ivice digitalnih signala uvedene su dve pomoćne tačkaste linije, koje označavaju 0% i 100% nivoa posmatranog signala. U tom slučaju horizontalna centralna linija je na 50% posmatranog signala, druga horizontalna linija ispod centralne je na 10%, a druga horizontalna linija iznad centralne linije je na 90% posmatranog signala, kako je prikazano na slici 4.2.

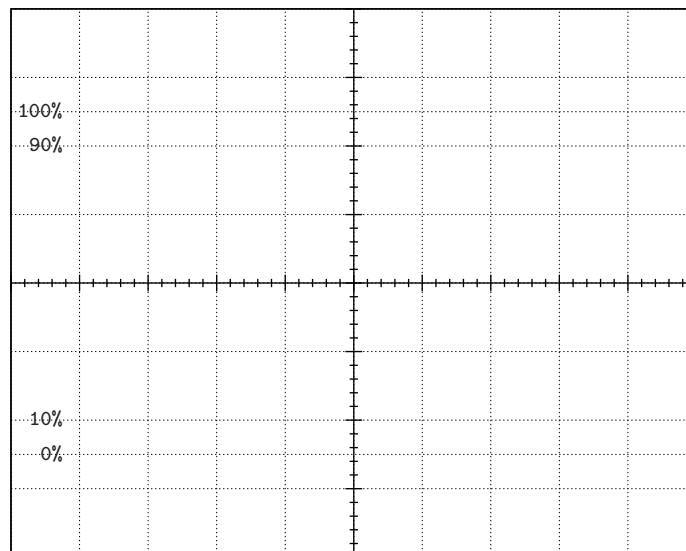
Za sva merenja koja će biti opisana podrazumevaće se da je sonda osciloskopa pravilno kompenzovana i da se potenciometri za kontinualnu promenu podele naponske i vremenske ose nalaze u kalibrisanim položajima, izuzev ako se drugačije izričito ne naglasi.

Merenje napona

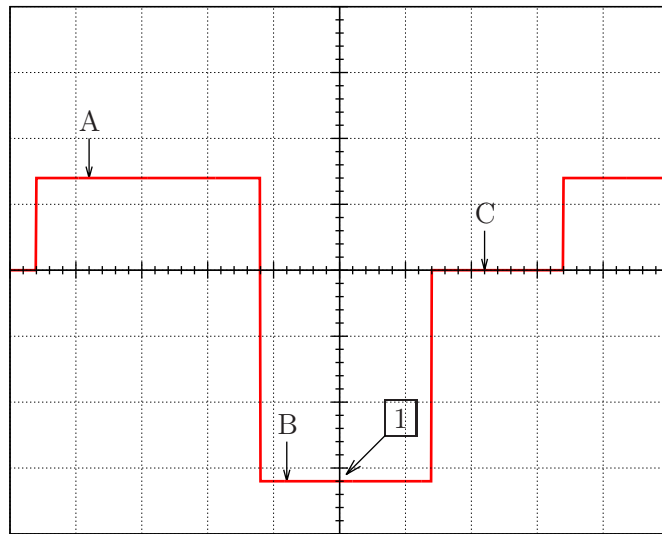
Merenje naponskog nivoa se svodi na merenje rastojanja na ekranu osciloskopa pogodnim korišćenjem njegove graduacije. Da bi se odredili naponski nivoi potrebno je znati gde se nalazi linija nultog potencijala i kolika je podela naponske ose. Podela naponske ose se može odrediti ispravnim očitavanjem sa preklopnika za podelu naponske ose specificiranog kanala, dok se pozicija linije nultog potencijala



Slika 4.1: Osnovna graduacija ekrana osciloskopa.



Slika 4.2: Proširena graduacija ekrana osciloskopa.



Slika 4.3: Merenje napona pomoću osciloskopa.

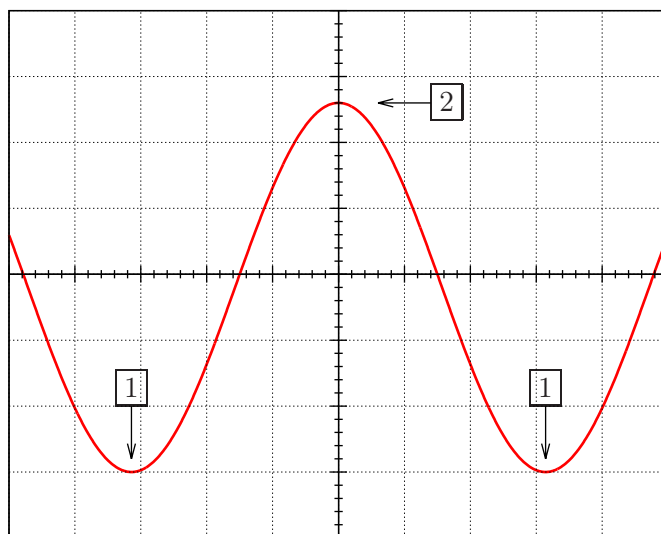
može odrediti prebacivanjem tropoložajnog preklopnika za selekciju tipa prikazivanja signala u položaj GND (slika 2.8). Na ekranu će se pojaviti horizontalna linija koja označava liniju nultog potencijala. Podešavanjem potencijometra \updownarrow POSITION (slika 2.8) moguće je dovesti liniju nultog potencijala na pogodno mesto radi lakšeg očitavanja, a obično je to neka od linija graduacije ekrana. U slučaju da se posmatraju samo pozitivni signali, pogodno je koristiti krajnju donju liniju, a za posmatranje stalno negativnih signala krajnju gornju. Naponski nivo se dobija množenjem rastojanja od linije nultog potencijala sa podelom naponske ose. Na slici 4.3 je prikazan jedan vremenski dijagram napona. Ukoliko je podela naponske ose 2 V/div i ako je linija nultog potencijala na centralnoj horizontalnoj liniji graduacije ekrana, naponski nivo A do koga od centralne linije ima 1.4 podeoka je 2.8 V , dok je naponski nivo B do koga od linije nultog napona ima -3.2 podeoka je -6.4 V .

Radi preciznijeg očitavanja naponskih nivoa pogodno je koristiti potencijometar za horizontalno pomeranje slike (slika 2.12, potencijometar \leftarrow POSITION \rightarrow), kako bi se mereni naponski nivo doveo na centralnu vertikalnu liniju graduacije gde su označene podele od po 0.2 podeoka, poput merenja označenog sa 1 na slici 4.3 kada je utvrđen nivo napona B od -6.4 V .

Merenje amplitude

Merenje amplitude je u osnovi merenje naponskog nivoa. Kako bi se što tačnije izmerila amplituda naizmeničnog signala, moguće je koristiti sledeći postupak:

1. Vertikalnim pomeranjem slike pozicionira se slika tako da minimalna vrednost signala leži na nekoj od horizontalnih linija, kako je prikazano na slici 4.4, gde je horizontalna linija na koju je postavljena minimalna vrednost signala -3 div , na šta ukazuju strelice označene sa 1.



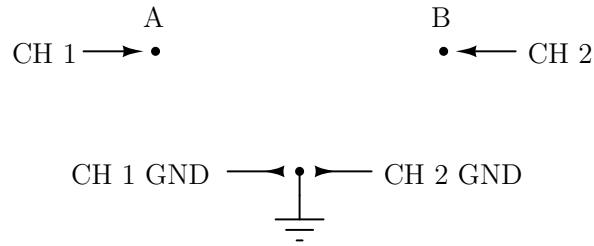
Slika 4.4: Merenje amplitude.

2. Horizontalnim pomeranjem slike pozicionira se maksimalna vrednost signala na centralnu vertikalnu liniju graduacije koja ima ucrtanu finu podelu naponske ose. Na primeru sa slike 4.4 maksimalna vrednost signala je na 2.6 div, na šta ukazuje strelica označena sa [2].
3. Očita se rastojanje od minimuma do maksimuma signala, u slučaju sa slike 4.4 to je 5.6 podeoka.
4. Izračuna se napon koji odgovara tom rastojanju, u slučaju da je podela naponske ose 5 V/div to je 28 V.
5. Izračuna se amplituda kao polovina vrednosti dobijene u prethodnoj tački, u slučaju sa slike 4.4 to je 14 V.

Merenje jednosmerne komponente

Ponekad je potrebno izmeriti jednosmernu komponentu naizmeničnih signala, što predstavlja problem u slučaju da je naizmenična komponenta složenoperiodična. U takvom slučaju se može koristiti sledeći postupak:

1. Posmatrani signal se dovede na oba kanala osciloskopa i posmatra se sa istom podelom naponske ose i istom linijom nultog potencijala.
2. Na kanalu 1 se prikaže trenutna vrednost signala, preklopnik za način prikazivanja signala je u položaju DC.
3. Na kanalu 2 se prikaže naizmenična komponenta signala, preklopnik za način prikazivanja signala je u položaju AC.



Slika 4.5: Posmatranje razlike potencijala dva čvora.

4. Pomeranjem potenciometra za vertikalno pozicioniranje slike sa kanala 2, \updownarrow POSITION, dovede se do poklapanja obe slike.
5. Preklopnik za način prikazivanja signala kanala 2 se prebaci u položaj GND. Rastojanje od nivoa nultog potencijala kanala 1 do linije koju pokazuje kanal 2 u položaju GND odgovara jednosmernoj komponenti posmatranog signala.

Posmatranje razlike potencijala dva čvora

Standardni osciloskopi na ekranu prikazuju potencijale čvorova na koje su povezane sonde koje dovode signale do kanalskih pojačavača. Za sve kanale osciloskopa, priključak za referentni potencijal kanala, takozvana „masa“ je na istom potencijalu, a to je potencijal uzemljenja osciloskopa. Kako će biti detaljno razmatrano u poglavlju 5, nepoznavanje ove činjenice može da dovede do grubih grešaka u merenju, kao i do oštećenja uređaja na kome se merenje vrši i/ili merne opreme. Kompletnosti radi, valja napomenuti da postoje i osciloskopi sa „galvanskim razdvajanjem“, poput osciloskopa prikazanog na slici 1.2, ali takvi osciloskopi su izuzetak, a ne pravilo. Uobičajeno je da osciloskop može da prikaže samo potencijale čvorova.

Međutim, u praksi se javlja potreba za posmatranjem napona između dva čvora kod uređaja koji su uzemljeni, pa time imaju isti referentni potencijal kao i osciloskop. Prikazivanje napona između dva čvora na ekranu osciloskopa je tada moguće korišćenjem dva kanala, povezivanjem kako je prikazano na slici 4.5. Pretpostavimo da je potrebno prikazati napon $u_{AB} = v_A - v_B$. Sonda sa kanala 1 je povezana tako da do osciloskopa dovede potencijal čvora A, v_A , sonda sa kanala 2 je povezana tako da dovede potencijal čvora B, v_B . U cilju prikazivanja napona u_{AB} potrebno je na oba kanala podesiti istu podelu naponske ose i proveriti da li se dugme za kontinualnu promenu pojačanja nalazi u kalibrisanom položaju, kako je objašnjeno u odeljku 2.3. Potom je preklopnik za izbor kanala potrebno postaviti u položaj BOTH, a preklopnik za izbor načina prikazivanja na ADD. Takođe, potrebno je preklopnik za invertovanje signala sa kanala 2 postaviti u položaj INVERT, odnosno uključiti invertovanje. Na ovaj način će na ekranu osciloskopa biti prikazan napon $u_{AB} = v_A - v_B$. Sve komande opisane u ovom odeljku su prikazane na slici 2.10. Opisani postupak uključuje niz analognih obrada signala, pa greška ovakvog merenja može biti veća u odnosu na merenja na potencijalima čvorova.

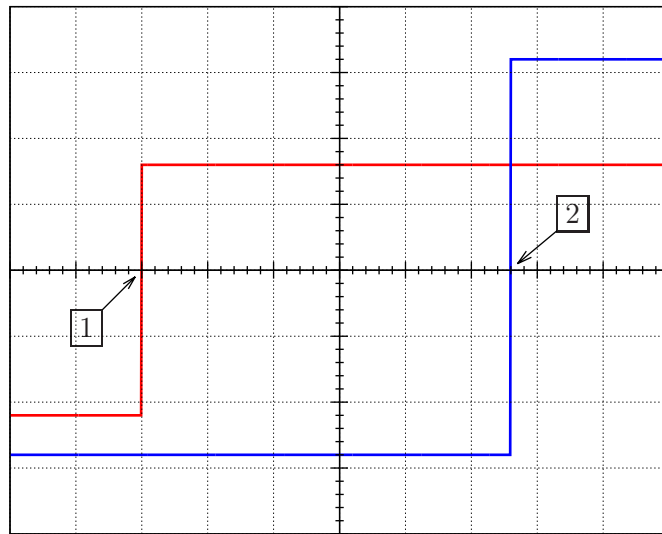
Merenje vremenskih intervala

Poput merenja naponskih nivoa, osciloskopom je moguće vršiti merenja vremenskih intervala. Ukoliko se mere intervali vremena na jednom signalu, merenje je potpuno analogno merenju napona, potrebno je samo izmeriti horizontalno rastojanje između dve tačke koje definišu mereni vremenski interval i preračunati ga u vreme u skladu sa podelom vremenske ose. Pri tom treba proveriti da li je potenciometar za kontinualnu promenu podele vremenske ose u kalibrisanom položaju i u kome je položaju preklopnik za povećavanje rezolucije vremenske ose.

U slučaju da se meri vremenski interval definisan karakterističnim tačkama na dva signala prikazanim preko dva kanala, treba biti izuzetno oprezan zbog različitih mogućnosti sinhronizacije u ovom slučaju. Na primer, kod osciloskopa Tektronix 2215A ukoliko se posmatraju dva signala i položaj preklopnika za izbor tipa prikazivanja (CHOP, ALT, ADD) je na ALT, te ukoliko je tip sinhronizacije VERTICAL MODE, sinhronizacija se vrši tako što je za prikazivanje vremenskog dijagrama svakog od posmatranih signala taj signal sinhronizacioni. Na ovaj način se gubi informacija o međusobnom faznom stavu signala i pravi se greška prilikom merenja vremenskih intervala definisanih između tačaka na signalima koje prikazuju različiti kanali. Stoga, u ovakvim slučajevima treba uvek imati jedinstven sinhronizacioni signal, bilo sa kanala 1, bilo sa kanala 2.

Procedura merenja vremenskih intervala definisanih karakterističnim tačkama na dva signala se stoga može formalizovati na sledeći način:

1. Postaviti izvor sinhronizacionog signala na CH 1, CH 2, LINE ili EXTERNAL, zavisno od potrebe, nikako ne koristiti VERTICAL MODE.
2. Koristiti isti način prikazivanja ulaznog signala na oba kanala (bilo AC ili DC). Na ovaj način se eliminiše (DC) ili kompenzuje (AC) uticaj ulaznog filtra u položaju AC.
3. Kod merenja kratkih vremenskih intervala na oba kanala treba koristiti sonde sa identičnim kašnjenjem, najbolje identične sonde.
4. Ukoliko je to moguće, koristiti istu podelu naponske ose za oba signala. Ovo je važno za signale visokih frekvencija, bliskih propusnom opsegu osciloskopa, kada kanalski pojačavači unose značajno fazno kašnjenje. Ukoliko su pojačanja pojačavača ista, ista su i fazna kašnjenja, pa se međusobno potiru.
5. Podesiti podele naponske i vremenske ose tako da se očitavanje rastojanja može izvršiti što tačnije.
6. Pogodnim horizontalnim i vertikalnim pozicioniranjem dovesti sliku u položaj da se očitavanje može izvršiti na centralnoj horizontalnoj liniji graduacije.
7. Očitati rastojanje između tačaka koje definišu mereni interval vremena i preračunati ga u vreme u skladu sa podelom vremenske ose.



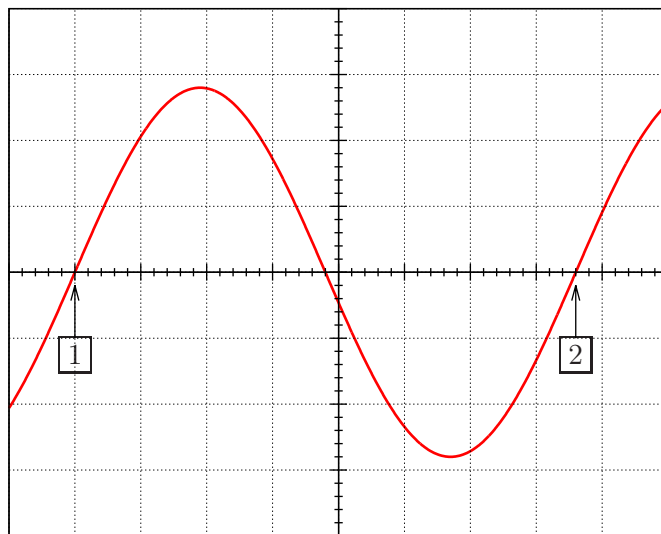
Slika 4.6: Merenje intervala vremena.

Na slici 4.6 je dat primer merenja vremenskog intervala definisanog uzlaznim ivicama dva nezavisna signala. Vremenski dijagrami oba signala su ispravno pozicionirani da se lako može izvršiti očitavanje sa malom greškom. Rastojanje između vremenskih trenutaka označenih sa **1** i **2** je 5.6 podeoka. Ako je podela vremenske ose bila $50 \mu\text{s}/\text{div}$, mereni vremenski interval traje $280 \mu\text{s}$.

Merenje periode i frekvencije

Merenje periode se svodi na merenje vremenskog intervala na dijagramu posmatranog signala. Na ekranu osciloskopa treba obezbediti prikazivanje jedne cele periode signala. Treba očitati rastojanje između početka i kraja posmatrane periode (za ovu svrhu je pogodno koristiti presečne tačke sa centralnom horizontalnom linijom graduacije ekrana) i izmereno rastojanje preračunati u vreme u skladu sa podelom vremenske ose.

Na slici 4.7 je prikazan primer merenja periode. Označeno je rastojanje koje definiše periodu, između dva uzlazna prolaska kroz nulu posmatranog signala. Prvi uzlazni prolazak kroz nulu, na koji ukazuje strelica označena sa **1**, je horizontalnim pozicioniranjem slike postavljen na -3 div , a sledeći uzlazni prolazak kroz nulu posmatranog signala, na koji ukazuje strelica označena sa **2**, se nalazi na 3.6 div . Stoga, perioda signala iznosi 7.6 podeoka (7.6 div). Ako je podela vremenske ose $2 \text{ ms}/\text{div}$, perioda posmatranog signala traje 15.2 ms , što odgovara frekvenciji od 65.8 Hz .



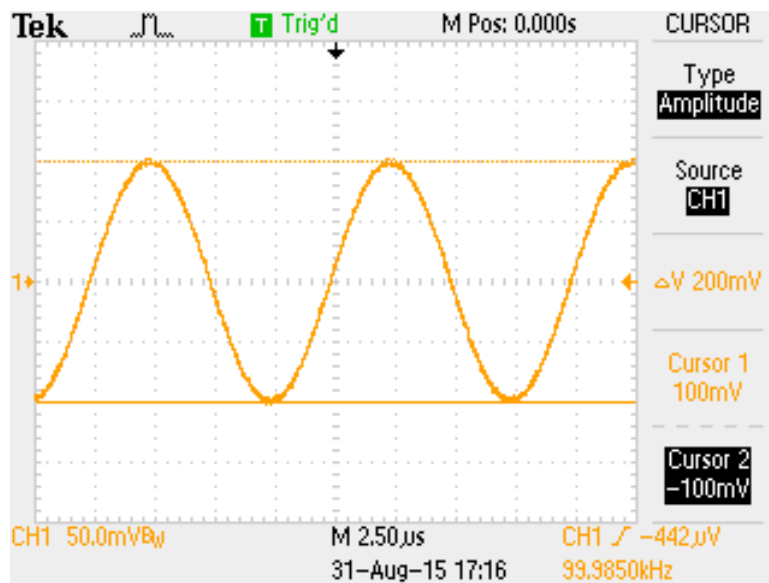
Slika 4.7: Merenje periode.

Korišćenje pokazivača i automatizovanih merenja kod digitalnih osciloskopa

Kao i analogni osciloskopi, i digitalni osciloskopi imaju graduisan ekran, ali se on isertava na displeju na isti način kao i slika. Graduacija se može koristiti za merenja, što se dosta često i čini. Za preciznija merenja i lakše, ali sporije, očitavanje, mogu se koristiti pokazivači (kursori, *cursors*), koji se lako implementiraju u digitalnoj tehnologiji i skoro svi digitalni osciloskopi ih imaju. Takođe, kod digitalnih osciloskopa su vrlo često implementirana i digitalna merenja, zvanovana na digitalnoj obradi prikupljenih odbiraka.

Pokazivači mogu biti „naponski“, koji pokazuju nivoe na vertikalnoj osi, a vertikalna osa obično označava napon, otuda ime, i „vremenski“ koji označavaju vrednosti i intervale na horizontalnoj osi, koja najčešće predstavlja vreme. Na slici 4.8 je prikazan naponski signal doveden na kanal 1 digitalnog osciloskopa sa naponskim pokazivačima postavljenim sa ciljem da se izmeri amplituda signala. Na desnoj strani ekrana se očitava da je **Cursor 1** (pokazivač 1) na 100 mV, **Cursor 2** na -100 mV, a da razlika između njih ΔV iznosi 200 mV, pa je amplituda posmatranog signala $V_m = 100$ mV.

Na slici 4.9 je prikazan isti signal kao i na slici 4.8, samo su sada uključeni pokazivači horizontalne ose, poznati i kao „vremenski kursori“. Sa desne strane ekrana se može očitati da je **Cursor 1** na $-5.20 \mu\text{s}$, da je **Cursor 2** na $4.80 \mu\text{s}$, da razlika između njih Δt iznosi $10.00 \mu\text{s}$, kao i da recipročna vrednost razlike vremena $\frac{1}{\Delta t}$ iznosi 100.0 kHz, što je u konkretnom primeru frekvencija signala, pošto pokazivači obuhvataju jednu periodu. Kako bi se sa većom pouzdanošću merila perioda, u listu podataka je uključena i razlika napona dve tačke na dijagramu na koje pokazivači ukazuju, ΔV , koja iznosi -2.00 mV. Idealno, ova razlika bi bila jednaka nuli ako je obuhvaćena perioda, ako se signal ponavlja. U konkretnom slučaju greška nije



Slika 4.8: Primena naponskih kursora, merenje amplitude.

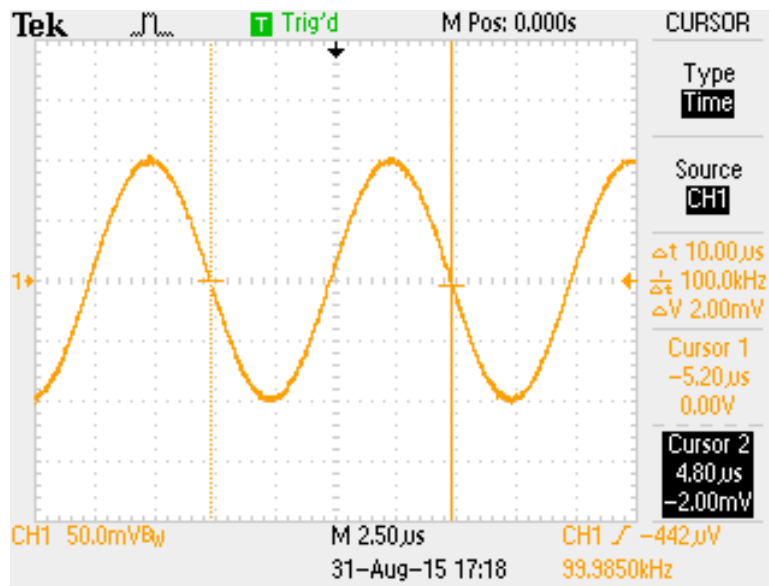
velika, iznosi 2% amplitude, što se može smatrati prihvatljivim.

Na slici 4.10 je prikazana slika na ekranu digitalnog osciloskopa kada se posmatra isti signal kao i u prethodnim primerima, ali se sa desne strane nalaze rezultati automatizovanih merenja parametara signala na kanalu 1. Rastojanje od minimalne do maksimalne vrednosti signala, označeno sa *Pk-Pk* (*peak-to-peak*) iznosi 204 mV, što se dobro slaže sa prethodnim merenjima, odstupanje je 2%, što je zbog šuma koji je u automatskom merenju uključen u rezultat, a u vizuelnom izboru novoa isključen, očekivano. Efektivna vrednost signala, što je označeno sa *Cyc RMS*, iznosi 70.1 mV, frekvencija (*Freq.*) je 99.85 kHz, a period je 10.02 μ s.

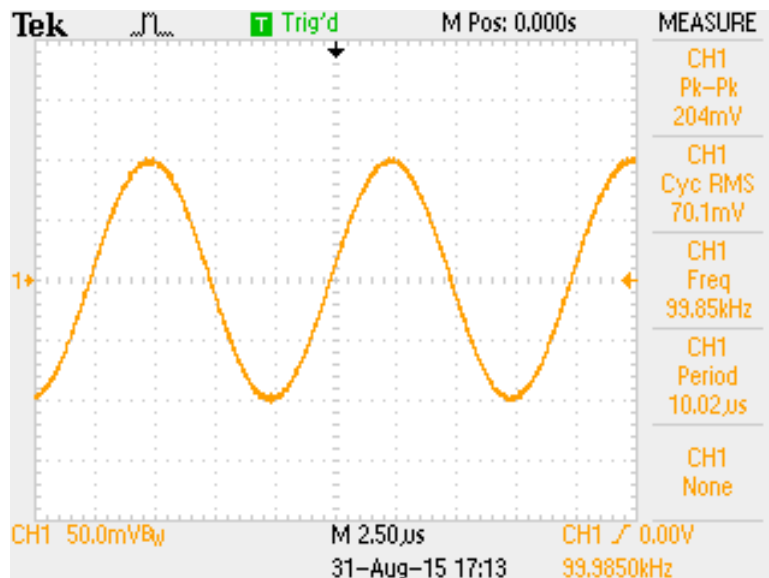
Za sva merenja za koja je potrebno poznavati frekvenciju signala, algoritam zahteva nekoliko perioda signala da bude prikazano na ekranu kako bi periodičnost bila ustanovljena, a perioda i frekvencija određene. Na slici 4.11 je prikazana slika ekrana osciloskopa kada se posmatra isti signal kao u prethodnim primerima i kada se vrše ista merenja kao u primeru sa slike 4.10, ali je na ekranu prikazana tačno jedna perioda signala. Algoritam tada nije u stanju da odredi periodu i frekvenciju, što je označeno sa ? u rezultatima merenja ovih veličina. Takođe, efektivna vrednost signala, što je parametar zavisian od poznavanja periode (računa se tokom periode signala), nije određena. Međutim, raspon od minimalne do maksimalne vrednosti signala je uspešno određen, pošto ne zavisi od periodičnosti niti od periode, i iznosi 204 mV, kao i u prethonom primeru.

Merenje trajanja usponske i silazne ivice digitalnih signala

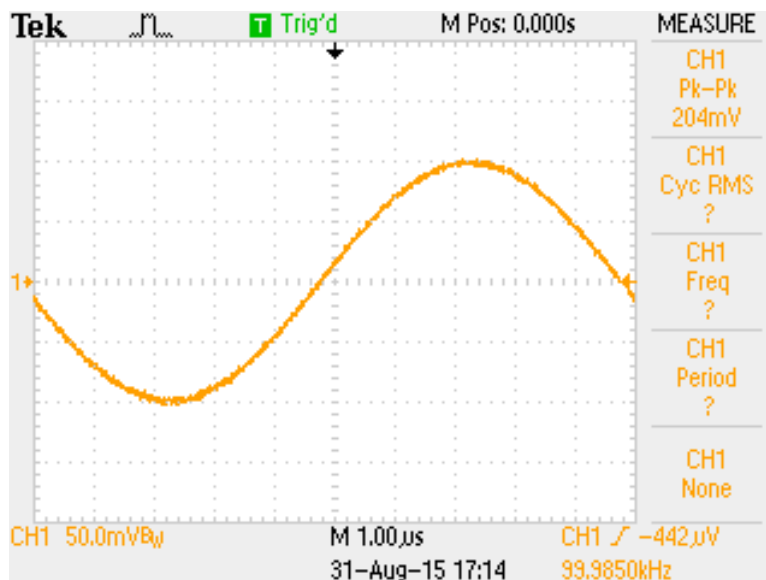
Trajanje usponske ivice digitalnih signala se definiše kao vreme koje protekne dok signal promeni nivo sa 10% na 90% razlike između početne i krajnje vrednosti. Analogno se definiše trajanje silazne ivice.



Slika 4.9: Primena vremenskih kursora, merenje periode i frekvencije.



Slika 4.10: Automatizovana merenja na vremenskom dijagramu.

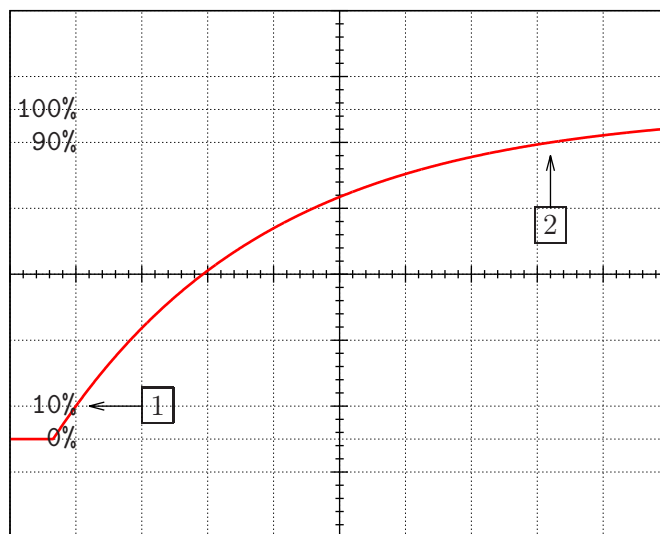


Slika 4.11: Automatizovana merenja na vremenskom dijagramu, problem u određivanju periode.

Za merenje trajanja usponske i silazne ivice digitalnih signala pogodno je koristiti pomoćne (tačkaste) linije graduacije ekrana. Pre svega, na ekranu treba obezbediti stabilno prikazivanje signala na kome se merenje viši (sinhronizovati sliku) i postaviti nivo logičke nule na donju pomoćnu liniju graduacije (tačkasta linija sa oznakom 0%), a nivo logičke jedinice na gornju pomoćnu liniju (tačkasta linija sa oznakom 100%). Kako bi se ovo postiglo, potrebno je podešavati vertikalnu poziciju slike i koristiti kontinualnu podelu naponske ose (apsolutni nivoi napona nisu bitni, već njihovi odnosi, normalizovane vrednosti na razliku naponskih nivoa logičke jedinice i logičke nule). Izborom sinhronizacije na usponku ili na silaznu ivicu, podešavanjem nivoa praga za sinhronizaciju (trigger level) i izborom pogodne podele vremenske ose treba obezbediti sliku na ekranu osciloskopa sa koje je moguće izvršiti očitavanje trajanja ivice sa malom greškom. Primer ispravno pozicionirane slike i dobro određene podele vremenske ose je prikazan na slici 4.12.

Početak trajanja usponske ivice je označen trenutkom kada signal dostigne 10% svoje krajnje vrednosti, odnosno presekom dijagrama posmatranog signala sa drugom horizontalnom linijom graduacije ispod centralne horizontalne linije. Radi lakšeg očitavanja, horizontalnim pozicioniranjem slike treba obezbediti da ova tačka leži na nekoj od vertikalnih linija graduacije ekrana, kako je to prikazano na slici 4.12, gde je tačkom 1 označen početak trajanja usponske ivice.

Kraj trajanja usponske ivice je definisan trenutkom kada signal dostigne 90% svoje krajnje vrednosti, odnosno presekom dijagrama posmatranog signala sa drugom horizontalnom linijom graduacije iznad centralne horizontalne linije, što je označeno tačkom 2 na dijagramu sa slike 4.12. Kako bi se odredilo trajanje usponske ivice treba odrediti horizontalno rastojanje između tačaka 1 i 2, koje u primeru sa slike 4.12 iznosi 7.2 podeoka. Na kraju treba u skladu sa podelom vremenske ose preračunati rastojanje između tačaka 1 i 2 u vreme. U slučaju da je podela vremenske ose u analiziranom primeru $0.5 \mu\text{s}/\text{div}$, trajanje usponske ivice iznosi $3.6 \mu\text{s}$.

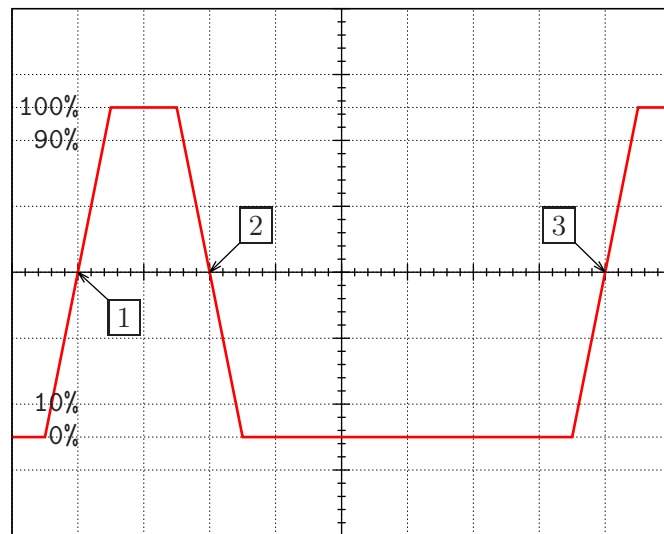


Slika 4.12: Merenje trajanja usponske ivice.

Potpuno analogno merenju trajanja usponske ivice meri se trajanje silazne ivice. Najčešće je potrebno samo promeniti ivicu signala na koju se sinhronizacija vršina silaznu, izvršiti malo podešavanje horizontalne pozicije slike i očitati trajanje silazne ivice.

Merenje trajanja impulsa, pauze i faktora ispunjenosti

Impulsna širinska modulacija se široko koristi u brojnim oblastima elektrotehnike, a zasnovana je na pojmu faktora ispunjenosti impulsa koji se koristi kao nosilac informacije ili upravljačkog dejstva. Kako bi definisali pojmove trajanja impulsa, trajanja pauze i faktora ispunjenosti (*duty ratio*), posmatrajmo signal prikazan na slici 4.13. Podešavanja vertikalne ose su izvedena kako je opisano u odeljku 4.9, tako da nivo koji odgovara logičkoj vrednosti 1 bude na oznaci 100%, a nivo koji odgovara logičkoj vrednosti 0 na 0%. Za merenje trajanja impulsa, trajanja pauze i merenje faktora ispunjenosti, smatraćemo da signal ima ili logičku vrednost 0 ili logičku vrednost 1, pa će granica za odlučivanje biti postavljena na 50% raspona između nivoa za logičko 0 i logičko 1, što odgovara centralnoj horizontalnoj liniji graduacije ekrana. Ovaj nivo se često naziva prag odlučivanja. Početak posmatrane periode signala je određen uzlaznim prelaskom preko praga odlučivanja, što je na slici 4.13 označeno sa [1]. Trajanje logičke jedinice, koje se često prilično neprecizno naziva trajanjem impulsa, ograničeno je silaznim prolaskom signala kroz prag odlučivanja, što je na slici 4.13 označeno sa [2]. Kraj posmatrane periode signala je određen ponovnim uzlaznim prolaskom kroz prag odlučivanja, što je na slici 4.13 označeno sa [3]. Merenjem na dijagramu sa slike 4.13 može se ustanoviti da trenuci vremena koji odgovaraju navedenim događajima su $t_1 = -4 \text{ div}$, $t_2 = -2 \text{ div}$



Slika 4.13: Merenje faktora ispunjenosti impulsa.

i $t_3 = 4 \text{ div}$. Trajanje impulsa, odnosno preciznije rečeno trajanje logičke vrednosti 1, je $T_1 = t_2 - t_1 = 2 \text{ div}$. Trajanje pauze, odnosno trajanje logičke vrednosti 0 je $T_0 = t_3 - t_2 = 6 \text{ div}$. Trajanje periode je $T = t_3 - t_1 = 8 \text{ div}$. Faktor ispunjenosti impulsa je definisan kao odnos trajanja impulsa (logičkog 1) i periode

$$D \triangleq \frac{T_1}{T} \quad (4.1)$$

što u konkretnom primeru sa slike 4.13 iznosi $D = 2 \text{ div} / 8 \text{ div} = \frac{1}{4} = 0.25$. Normalizovano trajanje pauze se definiše kao

$$D' \triangleq \frac{T_0}{T} \quad (4.2)$$

što u primeru sa slike 4.13 iznosi $D' = 6 \text{ div} / 8 \text{ div} = \frac{3}{4} = 0.75$.

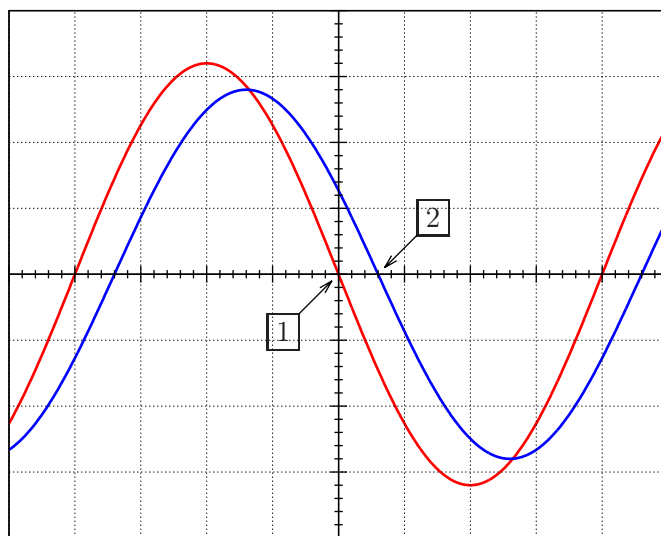
Za D i D' definisane sa (4.1) i (4.2) sa pragom odlučivanja izabranim tako da trenutna vrednost signala određuje logičku vrednost ili 0 ili 1, bez neodređenog stanja, važi

$$D + D' = 1. \quad (4.3)$$

Merenje fazne razlike

Za merenje fazne razlike je pre svega potrebno obezbediti jedinstveni izvor sinhronizacionog signala, ili sa kanala 1 ili sa kanala 2, kako je diskutovano u odeljku 4.6. Kako bi međusobni fazni stav bio očuvan, ne treba koristiti VERT MODE sinhronizaciju. Kod digitalnih osciloskopa VERT MODE način sinhronizacije najčešće nije ni implementiran.

Merenje fazne razlike između dva sinusoidalna signala se može svesti na merenje periode signala (T) i vremenske razlike između dva susedna uzlazna ili silazna prolaska kroz nulu tih signala (Δt). Postupci merenja ove dve veličine su



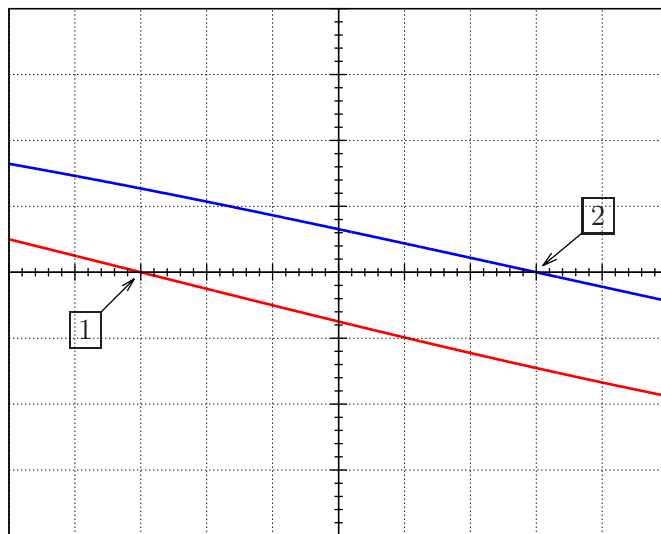
Slika 4.14: Merenje fazne razlike.

objašnjeni u odeljcima 4.7 i 4.6, respektivno. Fazna razlika se tada izračunava kao $\varphi = 2\pi \frac{\Delta t}{T} = 360^\circ \frac{\Delta t}{T}$.

Drugi, ali suštinski isti, način merenja fazne razlike je zasnovan na korišćenju potencijometra za kontinualnu promenu podele vremenske ose. Pre svega, signale čija se fazna razlika meri potrebno je dovesti na ulaze osciloskopa korišćenjem sonde sa identičim kašnjenjem, prikazati ih na isti način: korišćenjem istog položaja preklopnika za način prikazivanja signala (bilo AC, bilo DC), sa istim nivoom nultog potencijala za oba kanala, sa istim pojačanjem kanalskog pojačavača ako je to ikako moguće. Koristeći potencijometar za kontinualnu promenu podele vremenske ose treba podesiti podelu vremenske ose tako da jedna perioda posmatranih signala zauzima tačno 8 podeoka. Na taj način vrednost jednog podeoka horizontalne ose u faznom uglu iznosi $360^\circ/8 = 45^\circ$.

Primer merenja fazne razlike dva signala primenom kontinualnog podešavanja podele vremenske ose je prikazan na slici 4.14. Fazna razlika je merena kao rastojanje između dva silazna prolaska kroz nulu posmatranih signala i u posmatranom primeru iznosi 0.6 podeoka. Stoga je merena fazna razlika $0.6 \times 45^\circ = 27^\circ$.

Kako bi se povećala tačnost merenja fazne razlike signala u slučajevima da je fazna razlika mala, moguće je koristiti prekidač za desetostruko povećanje rezolucije vremenske ose. Promenom stanja prekidača na $\times 10$ će se rezolucija povećati 10 puta, pa će vrednost jednog podeoka horizontalne ose iznositi 4.5° . Moguće je da prilikom povećanja rezolucije prolasci posmatranih signala kroz nulu ne budu prikazani na ekranu. U tom slučaju podešavanjem horizontalne pozicije slike, \Leftarrow POSITION \Rightarrow , sinhronizacionog nivoa (trigger level, LEVEL) i eventualno promenom sinhronizacione ivice (SLOPE), treba prvo obezbediti prikazivanje dva susedna prolaska kroz nulu na ekranu osciloskopa, pa tek onda izvršiti očitavanje. Povećanje rezolucije vremenske ose na primeru sa slike 4.14 dovodi do dijagrama prikazanih na slici 4.15. Rastojanje između prolazaka kroz nulu posmatranih signala iznosi 6 podeoka, što



Slika 4.15: Merenje fazne razlike sa povećanom rezolucijom.

odgovara faznoj razlici od $6 \times 4.5^\circ = 27^\circ$. Na ovaj način je moguće tačnije merenje faznih razlika u opsegu do 45° , što odgovara širini ekrana osciloskopa od 10 div.

Merenje fazne razlike primenom Lisažuovih figura

Osciloskop se može koristiti i za prikazivanje međusobne zavisnosti dva naponska signala prebacivanjem preklopnika za promenu podele vremenske ose u X—Y položaj. Ovak način formiranja slike na osciloskopu se koristi za snimanje prenosne karakteristike nelinearnih kola, snimanje karakteristike magnećenja feromagnetskih materijala, kao i merenje faznog stava i frekvencije primenom Lisažuovih figura. U ovom odeljku će biti opisano merenje fazne razlike dva sinusoidalna signala primenom Lisažuovih figura.

Pretpostavimo da je na kanal osciloskopa koji kontroliše horizontalno skretanje elektronskog mlaza doveden signal oblika

$$x(t) = X_0 \sin(\omega_0 t) \quad (4.4)$$

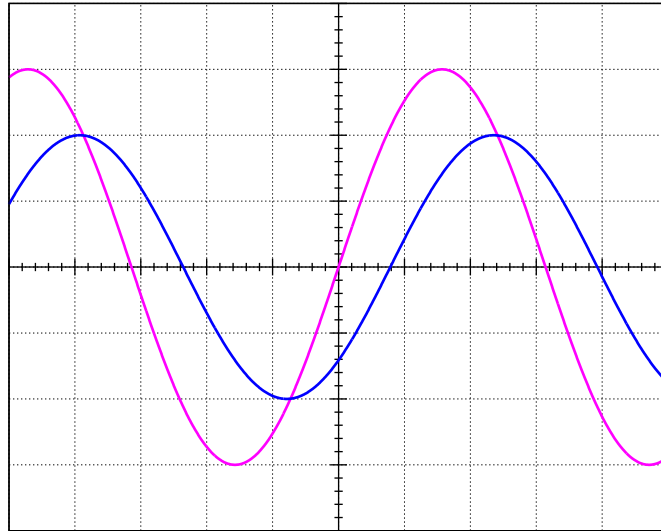
a da je na kanal koji kontroliše ploče za vertikalno skretanje doveden signal oblika

$$y(t) = Y_0 \sin(\omega_0 t - \varphi) \quad (4.5)$$

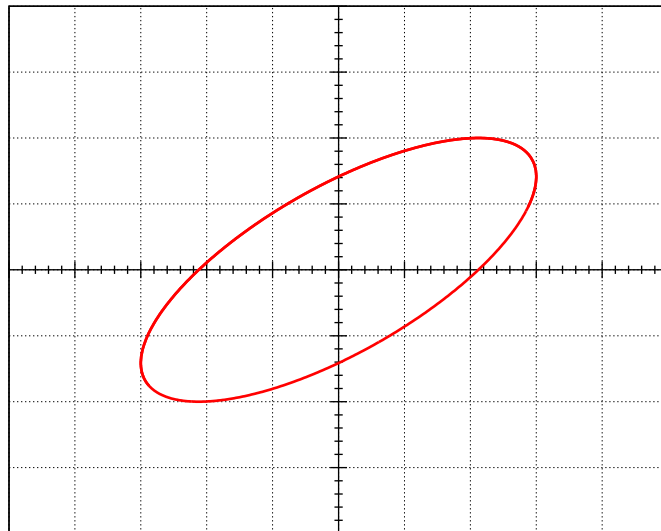
pri čemu je pretpostavljeno da je $X_0 > 0$, $Y_0 > 0$ i $-\pi \leq \varphi \leq \pi$. Cilj je da analizom dobijene slike identifikujemo vrednost φ . Signali određeni sa (4.4) i (4.5) su za $X_0 = 3 \text{ div}$ i $Y_0 = 2 \text{ div}$ i $\varphi = \frac{\pi}{4} = 45^\circ$ u vremenskom domenu prikazani na slici 4.16, dok je njihova međusobna zavisnost prikazana na slici 4.17.

Posmatrajmo tačke u kojima je $x(t_k) = 0$, kada je $\omega_0 t_k = k\pi$. Tada je

$$y(t_k) = (-1)^{k+1} Y_0 \sin(\varphi). \quad (4.6)$$



Slika 4.16: Merenje fazne razlike primenom Lisažuovih figura, vremenski domen.



Slika 4.17: Merenje fazne razlike primenom Lisažuovih figura, (x, y) ravan.

Uslov $x(t_k) = 0$ daje dve moguće vrednosti za $y(t_k)$, $y(t_k) = \pm Y_0 \sin(\varphi)$, pa svakako važi

$$|y(t_k)| = \left| y|_{x=0} \right| = Y_0 |\sin(\varphi)| \quad (4.7)$$

pošto je podrazumevano $Y_0 > 0$. Poznavanje Y_0 i $y|_{x=0}$ obezbeđuje informaciju potrebnu da se izračuna $|\sin(\varphi)|$.

Ako postavimo uslov $y(t_n) = 0$, što važi za $\omega_0 t_n - \varphi = n\pi$, za korespondentne vrednosti $x(t_n)$ dobija se

$$x(t_n) = (-1)^n X_0 \sin(\varphi). \quad (4.8)$$

Uslov $y(t_n) = 0$ daje dve moguće vrednosti za $x(t_n)$, $x(t_n) = \pm X_0 \sin(\varphi)$, pa važi

$$|x(t_n)| = \left| x|_{y=0} \right| = X_0 |\sin(\varphi)| \quad (4.9)$$

pošto je podrazumevano $X_0 > 0$. Poznavanje X_0 i $x|_{y=0}$ takođe obezbeđuje informaciju potrebnu da se izračuna $|\sin(\varphi)|$.

Na osnovu jednačina (4.7) i (4.9) se za apsolutnu vrednost sinusa fazne razlike dobija

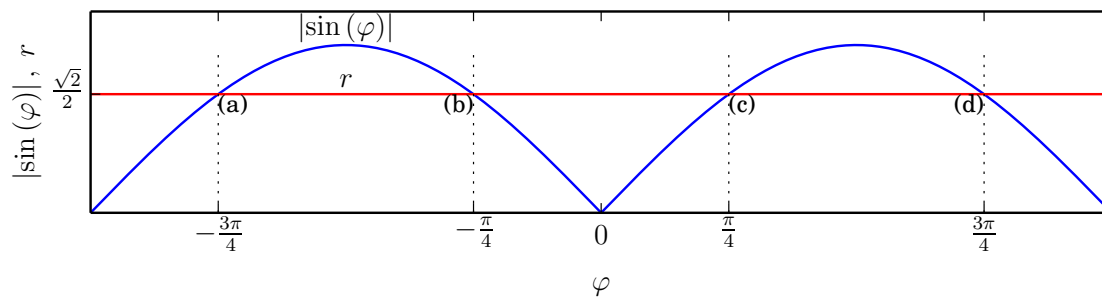
$$r \triangleq |\sin(\varphi)| = \frac{\left| y|_{x=0} \right|}{Y_0} = \frac{\left| x|_{y=0} \right|}{X_0}. \quad (4.10)$$

Na ovom mestu valja napomenuti da poznavanje $|\sin(\varphi)|$ određuje četiri vrednosti φ u opsegu $-\pi \leq \varphi \leq \pi$ koje zadovoljavaju $|\sin(\varphi)| = r$, gde je r vrednost utvrđena iz (4.10) merenjem:

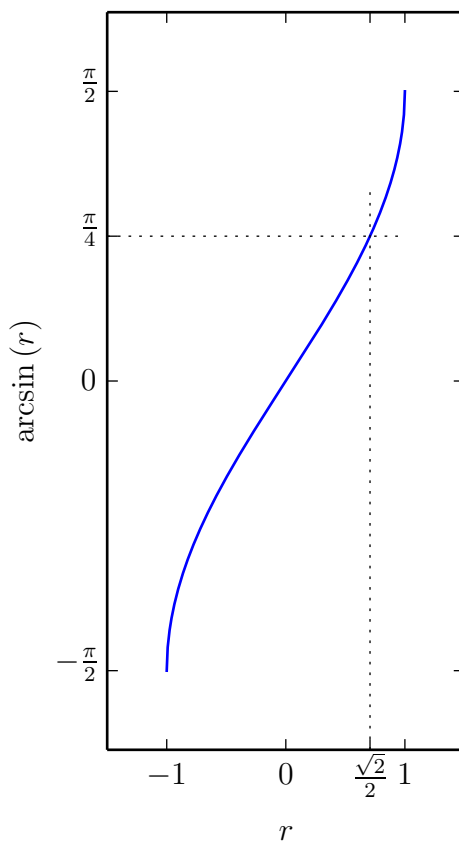
$$\varphi = \begin{cases} -\pi + \arcsin(r) & \text{za } -\pi \leq \varphi \leq -\frac{\pi}{2} & \text{(a)} \\ -\arcsin(r) & \text{za } -\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq 0 & \text{(b)} \\ \arcsin(r) & \text{za } 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2} & \text{(c)} \\ \pi - \arcsin(r) & \text{za } \frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \pi & \text{(d)} \end{cases} \quad (4.11)$$

što je za $r = \frac{\sqrt{2}}{2}$ prikazano na slici 4.18. Razlozi ovome su mogući opseg vrednosti faznog ugla $-\pi \leq \varphi \leq \pi$, širine 2π , još uvek nepoznata vrednost znaka $\sin(\varphi)$, a time i znaka φ u datom opsegu, kao i funkcija $\varphi = \arcsin(r)$ koja ima kodomen $-\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$, širine π , u kome se nalazi njena glavna vrednost. Na slici 4.19 je prikazana funkcija $\arcsin(r)$ u celom svom domenu i kodomenu, što je moguće prikazati jer su i domen i kodomen ove funkcije ograničeni. Kako je po svojoj definiciji $r \geq 0$, samo polovina krive sa slike 4.19 će biti od koristi, a za konkretan primer ona daje informaciju $\arcsin\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right) = \frac{\pi}{4}$. Izbor jedne od četiri vrednosti date sa (4.11) zahteva informaciju u kom se kvadrantu φ nalazi. Ova informacija se lako može dobiti posmatranjem signala u vremenskom domenu, a kasnije će biti razmotrene i tehnike identifikovanja kvadranta u kome je φ analizom smera iscrtavanja i oblika dobijene Lisažuove figure. Za početak ćemo na primeru razmotriti tehnike određivanja r merenjem.

Na slici 4.16 prikazani su vremenski dijagrami dva signala čiju faznu razliku je potrebno odrediti. Jedan od načina za rešavanje ovog problema, uobičajen, jeste primena metoda opisnaog u poglavlju 4.11. Drugi način, razmatran u ovom poglavlju, je da se nacrtaju parametarska kriva međusobne zavisnosti signala $x(t)$ i $y(t)$,



Slika 4.18: Rešenja jednačine $|\sin(\varphi)| = r$ za $-\pi \leq \varphi \leq \pi$.



Slika 4.19: Funkcija $\arcsin(r)$.

prikazana na slici 4.17. Za određivanje apsolutne vrednosti sinusa fazne razlike dva sinusoidalna signala primenom Lisažuovih figura, označenog sa r , potrebno je odrediti maksimalno skretanje elektronskog mlaza duž x ili y ose i presečnu tačku dobijene Lisažuove figure sa tom osom, kako je dato sa (4.10). Iako je merenja X_0 , $x|_{y=0}$, Y_0 i $y|_{x=0}$ moguće vršiti i na ovom dijagramu, u cilju preciznijeg očitavanja povoljno je kontinualnom promenom pojačanja Lisažuovu figuru povećati tako da u potpunosti ispuni ekran osciloskopa, a zatim izvršiti relativno merenje, pošto se ne traže vrednosti navedenih promenljivih, već njihovi odnosi. Cilj je da se kontinualnom promenom pojačanja kanalskih pojačavača dobije dijagram poput prikazanog na slici 4.20, gde je kontinualnom promenom pojačanja postignuto $Y_0 = 4 \text{ div}$ i $X_0 = 5 \text{ div}$. Sa $\boxed{1}$ je označeno merenje po kome je $y|_{x=0} = 2.8 \text{ div}$, dok je sa $\boxed{2}$ označeno merenje po kome je $x|_{y=0} = 3.6 \text{ div}$. Po merenju $\boxed{1}$ je

$$|\sin(\varphi)| = \frac{y|_{x=0}}{Y_0} = \frac{2.8 \text{ div}}{4 \text{ div}} = 0.7 \quad (4.12)$$

što odgovara glavnoj vrednosti $|\varphi| = 44.43^\circ$, dok je po merenju $\boxed{2}$

$$|\sin(\varphi)| = \frac{x|_{y=0}}{X_0} = \frac{3.6 \text{ div}}{5 \text{ div}} = 0.72 \quad (4.13)$$

što odgovara glavnoj vrednosti $|\varphi| = 46.05^\circ$. Srednja vrednost dva dobijena rezultata, koji bi u idealnom slučaju bili jednaki, je $|\varphi| = 45.24^\circ$. Primer je generisan na računaru sa $\varphi = 45^\circ$, pa se dobijeni numerički rezultati i njihovo međusobno neslaganje mogu iskoristiti kao ilustracija greške očitavanja na prilično gruboj skali osciloskopa, koja je jedini izvor greške u razmatranom numerički generisanom primeru. Takođe, valja napomenuti da je u navedenom primeru određen $r = |\sin(\varphi)|$, još uvek ne i φ .

Nakon uspešno određene vrednosti $|\sin(\varphi)|$, pitanje koje se nužno nameće je pitanje znaka, što je prvi od dva dodatna koraka u određivanju φ . Sama Lisažuova figura u određivanju znaka neće pomoći. Uvidom u Atlas Lisažuovih figura [7], uočava se da su one simetrične po φ , da je Lisažuova figura za npr. 30° ista kao i za -30° . Razlog tome je što je pri eliminaciji parametra $\omega_0 t$, u kome su združene dve promenljive, ω_0 i t , izgubljena i informacija o vremenu i informacija o frekvenciji. Ista je Lisažuova figura i za signale sa malom i za signale sa velikom frekvencijom. Ovo razmatranje može otići i korak dalje, dopuštajući i negativne vrednosti frekvencije, ne ulazeći u fizičku interpretaciju. Rezultat bi bio isti kao u slučaju da je frekvencija pozitivna, a da vreme teče unazad. Ova promena toka vremena dovodi do promene interpretacije šta ide prvo, šta prednjači, a šta kasni. Stoga, da bi odredili znak φ , moramo se vratiti u vremenski domen i pogledati u kom smeru se kreće tačka koja iscrtava Lisažuovu figuru, odnosno u kom smeru teče vreme, jer ta informacija određuje znak fazne razlike.

Za određivanje smeru rotacije tačke koja iscrtava Lisažuovu figuru prikazanu na slici 4.20 potrebno je na vremenskim dijagramima sa slike 4.16 uočiti da je prilikom uzlaznih prolazaka kroz nulu signala $x(t)$ signal $y(t) < 0$, dok je prilikom silaznih prolazaka kroz nulu signala $x(t)$ signal $y(t) > 0$. Samo jedna od ove dve informacije je dovoljna da se odredi smer rotacije po putanji prilikom iscrtavanja Lisažuove figuru

kao obrnut od smera kazaljke na satu. Strelicama iscrtanim u tačkama gde je razmatranje vršeno je na slici 4.21 označen smer rotacije tačke koja iscrtava Lisažuovu figuru.

U slučaju da je $\varphi < 0$ (podrazumevan opseg $-\pi \leq \varphi \leq \pi$), signal $y(t)$ fazno prednjači signalu $x(t)$, kako je prikazano na slici 4.22. Ovo za rezultat daje Lisažuovu figuru prikazanu na slici 4.23, koja je po obliku ista kao figura na slici 4.21, ali ima obrnut smer rotacije tačke koja je iscrtava, koji je sada u smeru kazaljke na satu.

Na opisani način je moguće, izlaskom iz „fazne ravni“ u vremenski domen, utvrditi znak fazne razlike, izuzev u slučajevima kada se Lisažuova figura degeneriše u duž, kada je $\varphi = 0$ i nema smisla govoriti o znaku, i kada je $\varphi = \pi$, kada su signali u protivfazi i potpuno je svejedno da li $y(t)$ fazno kasni za π ili fazno prednjači za π ; zbog periodičnosti sa 2π , rezultat je identičan.

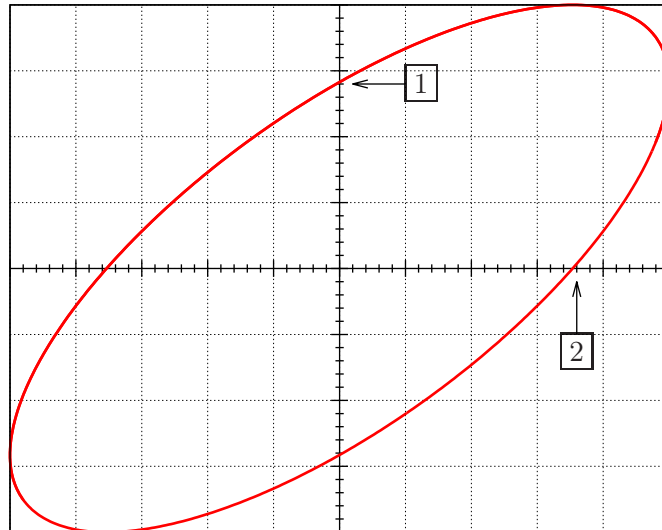
Za određivanje znaka φ , $-\pi \leq \varphi \leq \pi$, neophodno je vraćanje u vremenski domen, samo poznavanje međusobne zavisnosti x i y nije dovoljno da se znak odredi. Informacija o tome koji signal kasni je informacija o smeru u kome teče vreme, a u X–Y ravni ona je sadržana u smeru iscrtavanja krive. Slično tome, informacija o frekvenciji je sadržana u brzini iscrtavanja.

Nakon što je utvrđen znak fazne razlike, što je od četiri rešenja iz (4.11) eliminisalo dva, potrebno je još utvrditi da li je po apsolutnoj vrednosti fazna razlika veća ili manja od $\frac{\pi}{2}$, što će jednoznačno odrediti faznu razliku. Zbog simetrije u odnosu na znak, dovoljno je analizirati slučaj $\varphi > 0$, a nakon toga generalizovati zaključak. Nakon ove redukcije, sve što je potrebno je da se ustanovi razlika između slučajeva $0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$ i $\frac{\pi}{2} < \varphi < \pi$. Uvidom u Atlas Lisažuovog figura [7], uočava se razlika između razmatrana dva slučaja u trenucima kada je $y = 0$ i $x > 0$. U slučaju da je $0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$, $x(t)$ raste, kako je prikazano na slikama 4.16 i 4.21, a u slučaju $\frac{\pi}{2} < \varphi < \pi$ opada, kako je prikazano na slikama 4.24 i 4.25. U slučaju da je $\varphi = \frac{\pi}{2}$, $x(t)$ dostiže maksimum. Stoga, u slučaju $0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$ velika osa elipse prolazi kroz prvi i treći kvadrant, a u slučaju da $\frac{\pi}{2} < \varphi < \pi$ velika osa prolazi kroz drugi i četvrti kvadrant, kako je prikazano na slikama 4.21 i 4.25. Slučajevi sa slika 4.21, 4.23 i 4.25 imaju istu vrednost $r = |\sin(\varphi)| = \frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0.7071$.

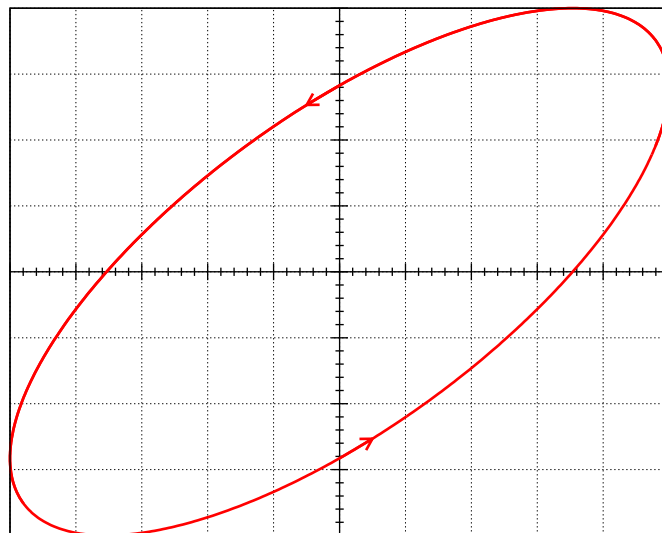
Na osnovu navedenog, algoritam za određivanje fazne razlike primenom Lisažuovih figura se može svesti na sledeća četiri koraka:

1. Merenjem i primenom (4.10) se odredi $r = |\sin(\varphi)|$.
2. Ustanovi se smer iscrtavanja Lisažuove figure. Ako je u smeru obrnutom od smera kazaljke na satu, $\varphi > 0$ i φ se određuje iz (4.11) (c) ili (d). Ako je u smeru kazaljke na satu, $\varphi < 0$ i φ se određuje iz (4.11) (a) ili (b).
3. Ustanovi se pozicija velike ose elipse razmatrane Lisažuove figure. Ako je u prvom i trećem kvadrantu, φ se određuje iz (4.11) (b) ili (c). Ako je u drugom i četvrtom kvadrantu, φ se određuje iz (4.11) (a) ili (d).
4. Primenom odgovarajuće formule iz (4.11) se odredi φ .

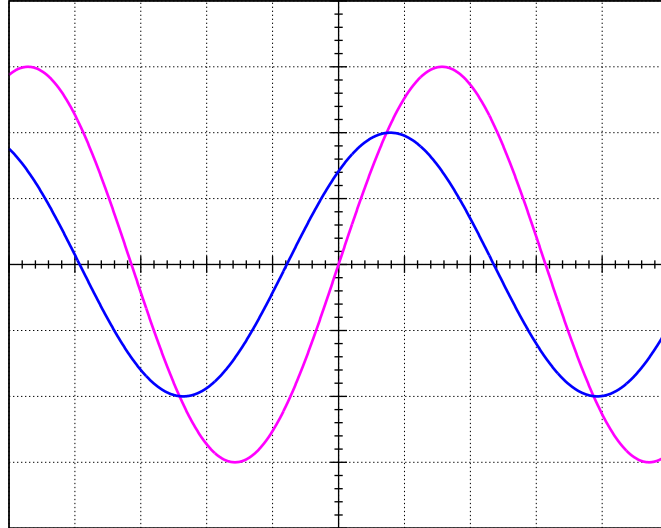
Za $|\sin(\varphi)| = \frac{\sqrt{2}}{2}$ slučaj (c) je prikazan na slici 4.21, slučaj (b) je prikazan na slici 4.23, dok je slučaj (d) prikazan na slici 4.25. U sva tri prikazana slučaja $|\sin(\varphi)|$



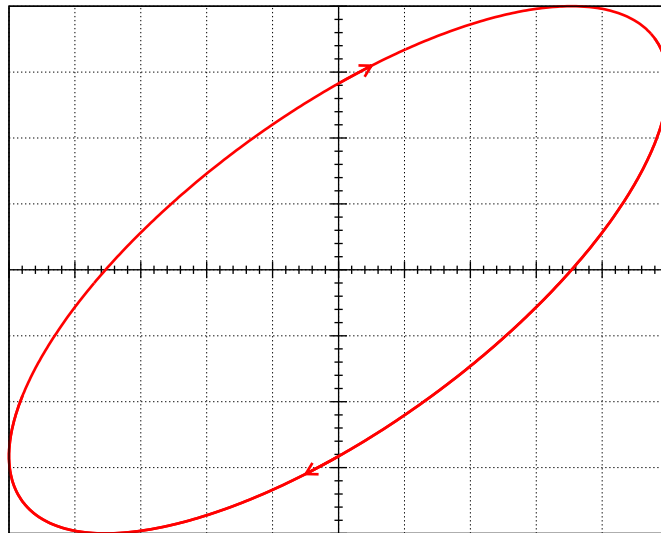
Slika 4.20: Merenje fazne razlike primenom Lisažuovih figura, (x, y) ravan, podešeno pojačanje da se dobije maksimalna veličina Lisažuove figure.



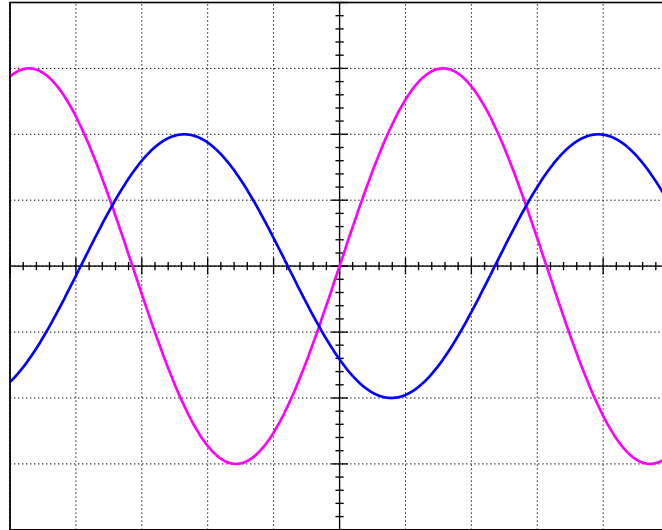
Slika 4.21: Merenje fazne razlike primenom Lisažuovih figura, $\varphi > 0$, slučaj (4.11) pod (c).



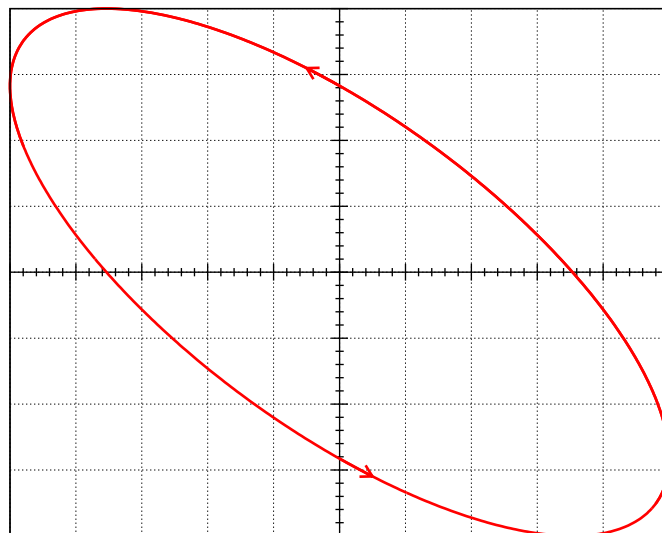
Slika 4.22: Merenje fazne razlike primenom Lisažuovih figura, vremenski domen, $\varphi < 0$.



Slika 4.23: Merenje fazne razlike primenom Lisažuovih figura, $\varphi < 0$, slučaj (4.11) pod (b).



Slika 4.24: Merenje fazne razlike primenom Lisažuovih figura, vremenski domen, $\varphi > \frac{\pi}{2}$.



Slika 4.25: Merenje fazne razlike primenom Lisažuovih figura, $\varphi > \frac{\pi}{2}$, slučaj (4.11) pod (d).

ima istu vrednost, a vrednost φ je određena analizom dodatnih parametara slike: nagnutošću velike ose i smeru iscrtavanja.

U zaključcima vezanim za metod određivanja fazne razlike primenom Lisažuovih figura valja napomenuti da slika 4.16 sadži više informacija od slike 4.17. Uvek je moguće na osnovu slike 4.16 konstruisati sliku 4.17, ali obrnuto nije jednoznačno moguće: slika 4.17 ne sadrži informaciju o brzini promene signala, odnosno frekvenciji, kao ni o znaku fazne razlike, odnosno smeru toka vremena.

Sada je pogodan trenutak da se uporedi upravo opisani algoritam sa algoritmom izloženim u odeljku 4.11, što ćemo ostaviti čitaocu. Bez obzira na prilično jasan zaključak, određivanje faznog stava primenom Lisažuovih figura ima nesumnjivu obrazovnu vrednost i omogućava pogled na dinamičke procese iz drugog ugla, iz koga se ponekad može uočiti više, što će postati očigledno kroz odeljke koji slede.

Određivanje odnosa frekvencija primenom Lisažuovih figura

Vreme i frekvencija su fizičke veličine koje je moguće meriti sa velikim brojem tačnih cifara čak i relativno jeftinim uređajima. Merenje frekvencije primenom Lisažuovih figura, iako moguće, nije zastupljeno u praksi. Ipak, analiza „Lisažuovih figura višeg reda“ ima obrazovnu vrednost, pošto se kroz nju mogu izgraditi načini razmišljanja i tehnike koje se mogu koristiti u drugim oblastima. Osim toga, Lisažuove figure višeg reda se često koriste kao znak (logo) pojedinih proizvođača, na reklamnim materijalima za osciloskope, a često se javljaju i u filmovima, pa odeljak posvećen njima ima i opšteobrazovni značaj.

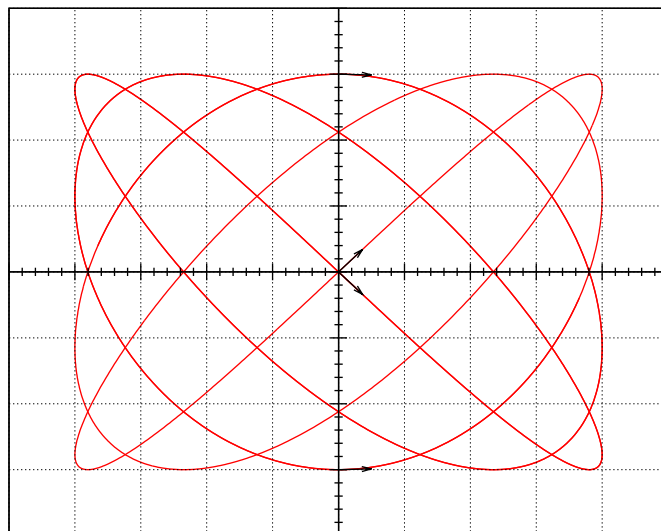
Pretpostavimo da su na osciloskop dovedena dva prostoperiodična signala koji mogu imati različite frekvencije, a tim i periode, gde je T_x perioda signala koji kontroliše skretanje po x osi, a T_y perioda signala koji kontroliše skretanje po y osi. Ukoliko postoje prirodni brojevi m i n ($m, n \in \mathbb{N}$) takvi da je

$$m T_x = n T_y = T \quad (4.14)$$

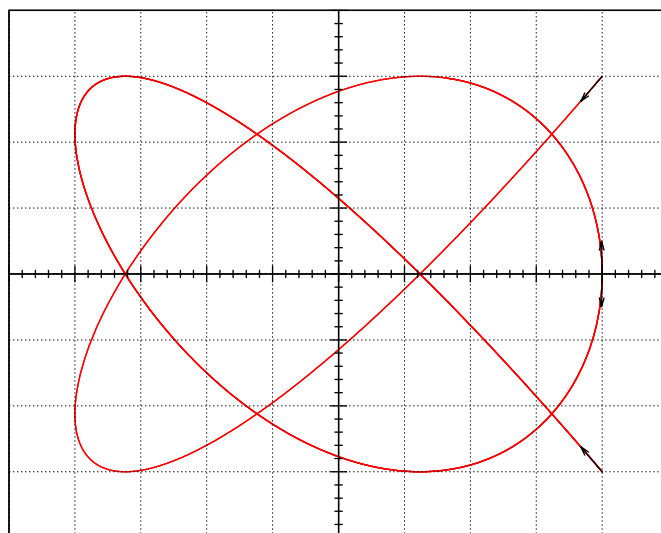
nakon intervala vremena T će se oba signala (u smislu „i jedan i drugi“) ponavljati, $x(t + T) = x(t)$ i $y(t + T) = y(t)$ pa će T biti njihov zajednički period. Za takve signale kažemo da imaju samerljive periode. Takođe, i frekvencije su im samerljive, pošto je u tom slučaju

$$m f_y = n f_x \quad (4.15)$$

gde je $f_x = 1/T_x$ i $f_y = 1/T_y$. Na dalje ćemo podrazumevati da su m i n najmanji brojevi za koje (4.14) i (4.15) važi, pa je onda T osnovni zajednički period. U tom slučaju, na ekranu osciloskopa će se pojaviti stabilna slika čije iscrtavanje traje T . Uostalom, sistem za sinhronizaciju, razmatran u odeljku 2.5, obezbeđivao je samerljivost perioda posmatranog signala i generatora linearne vremenske baze kako bi se na ekranu dobila stabilna slika. U cilju ilustrovanja, na slici 4.26 je prikazana slika koja se na ekranu osciloskopa pojavljuje ako se na ulaze dovedu sinusoidalni naponi sa odnosom frekvencija $f_x : f_y = 4 : 5$. Strelice na slici 4.26 označavaju smer kretanja tačke koja prikazanu konturu iscrtava, koja je zbog periodičnosti zatvorena.



Slika 4.26: Merenje odnosa frekvencija primenom Lisažuovih figura, $x = 4 \operatorname{div} \sin(4\omega t)$, $y = 3 \operatorname{div} \sin(5\omega t)$.



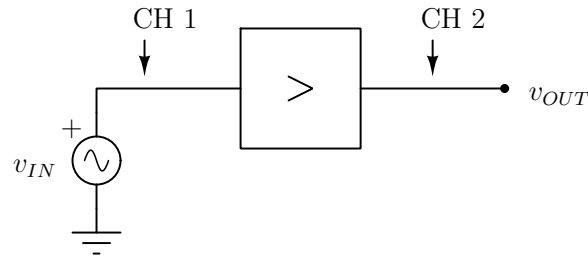
Slika 4.27: Degenerisana Lisažuova figura, $x = 4 \operatorname{div} \cos(4\omega t)$, $y = 3 \operatorname{div} \cos(5\omega t)$.

Na osnovu dijagrama poput dijagrama sa slike 4.26 je moguće odrediti odnos frekvencija signala dovedenih na osciloskop. Kako bi se to postiglo, potrebno je prvo definisati događaj koji identifikuje početak periode. Za ovo se tipično uzima uzlazni ili silazni prolazak signala kroz nulu, dostizanje maksimuma ili minimuma. Potom je potrebno proći po celoj Lisažuovoj figuri višeg reda, sve do povratka u polaznu tačku iz smera suprotnog od smera polaska, i pri tom brojati događaje koji identifikuju periode signala koji kontrolišu skretanje po x i po y osi. Na primer, na slici 4.26 signal koji kontroliše skretanje po x osi 4 puta dostiže maksimum tokom iscrtavanja krive, dok signal koji kontroliše skretanje po y osi 5 puta dostiže maksimum. To znači da u jednu periodu T zajedničku za oba signala staje 4 periode signala $x(t)$, $4T_x$ i 5 perioda signala $y(t)$, $5T_y$, pa je u skladu sa (4.14) $m = 4$, $n = 5$, a prema (4.15) je $4f_y = 5f_x$, odnosno $f_x/f_y = 4/5$. Na ovaj način je moguće meriti frekvenciju koja je samerljiva sa poznatom frekvencijom referentnog izvora, kada je njihov odnos racionalan broj, ali u današnje vreme su obično dostupni praktičniji metodi.

Atlas Lisažuovih figura sa 400 primera određivanja odnosa frekvencija je dat u [8].

Lisažuove figure mogu ispoljiti degeneraciju kada se kontura pretvara u liniju. Za Lisažuove figure prvog reda taj slučaj nastaje kada su signali u fazi ili u protivfazi, kada se elipsa degeneriše u duž. U slučaju figura višeg reda, jedan karakterističan primer su signali $x(t) = \cos(\omega t)$ i $y(t) = \cos(n\omega t)$ kada se na ekranu osciloskopa prikazuje Čebiševljev polinom prve vrste n -tog reda. Degeneracije Lisažuovih figura sa konture na liniju se događaju u slučajevima kada je međusobni fazni stav signala koji formiraju sliku takav da signali istovremeno dostižu ekstremume. Zbog simetrije u okolini ekstremuma, tačka koja iscrtava Lisažuovu figuru se vraća iz ekstremuma po istoj putanji po kojoj je u ekstremum došla. Krajeve linije u koju se Lisažuova figura degenerisala, „krajnje tačke“, stoga uvek treba tražiti u ekstremumima, što je ilustrovano u Atlasu Lisažuovih figura koji prikazuje degenerisane krive [9].

Opisane degeneracije mogu da dovedu do grešaka u računanju odnosa frekvencija, pošto se slika redukuje. U cilju ilustrovanja ovog problema, posmatrajmo figuru na slici 4.27 u koju se degeneriše Lisažuova figura sa slike 4.26 kada kontrolišući signali imaju odgovarajući fazni stav, što je u konkretnom slučaju postignuto promenom funkcije za generisanje slike sa sinus na kosinus. Kriva sa slike 4.27 je bitno jednostavnijeg izgleda. Sa desne strane krive se uočavaju dve „krajnje tačke“ linije u koju se kontura pretvorila, što je znak degeneracije. Linija dodiruje maksimum po x osi u tri tačke, dok minimum dodiruje u dve. Po y osi i minimum i maksimum su dostignuti u tri tačke. U ovakvom slučaju, odnos frekvencija treba pažljivo odrediti tako što se pređe preko cele degenerisane Lisažuove figure, npr. olovkom, i broje se tačke koje karakterišu period, a to su najčešće uzlazni prolasci kroz nulu, silazni prolasci kroz nulu, maksimumi ili minimumi. Takvim postupkom, pošavši iz neke tačke na krivoj koja nije maksimum, prelazeći po celoj krivoj u oba smera, sve do vraćanja u polaznu tačku iz smera suprotnog od smera u kome je obilazak krenuo, uočava se da je maksimum po x osi dostignut četiri puta (kroz maksimum za $y = 0$ se prolazi dva puta), dok se maksimum po y osi dostiže pet puta, pri čemu se jednom prolazi kroz krajnju tačku krive u gornjem desnom uglu, a dva puta kroz maksimume levo od nje. Stoga je odnos perioda za degenerisanu Lisažuovu figuru sa slike 4.27 isti



Slika 4.28: Snimanje prenosnih karakteristika nelinearnih kola.

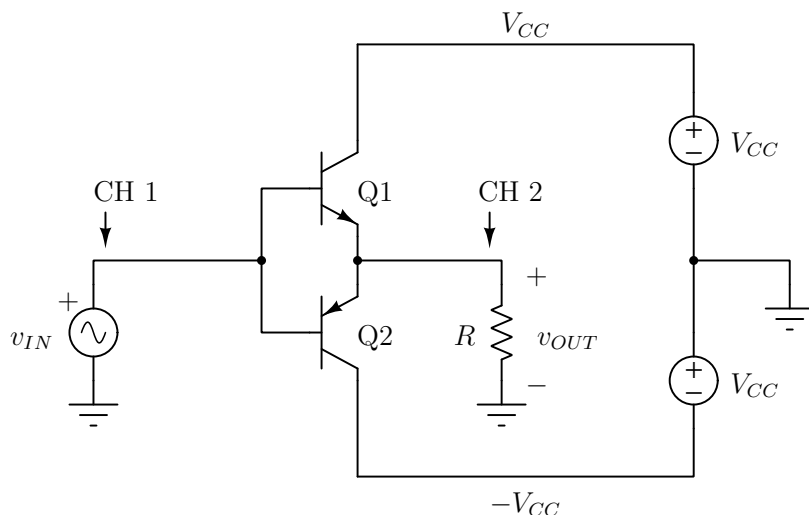
kao i za figuru sa slike 4.26, $T_x : T_y = 4 : 5$.

Atlas Lisažuovih figura koji tretira degenerisane krive sadrži 200 primera degeneracija konture u liniju, od kojih je polovina uzrokovana simultanošću maksimuma kontrolišućih signala, a polovina simultanošću maksimuma i minimuma kontrolišućih signala, dat je u [9].

Snimanje prenosnih karakteristika nelinearnih kola

Prikazivanje međusobne zavisnosti dva signala, razmatrano na primerima analize Lisažuovih figura, u praksi se koristi za snimanje prenosnih karakteristika nelinearnih kola. Na primer, pojačavač u idealnom slučaju ima linearnu prenosnu karakteristiku, $v_{OUT} = A v_{IN}$, gde je v_{IN} ulazni, a v_{OUT} izlazni napon. Realizovani pojačavači, iz niza razloga, imaju prenosnu karakteristiku koja u nekoj meri odstupa od linearne, pa je potrebno takve prenosne karakteristike u nekim slučajevima prikazati i snimiti. Sistem za snimanje prenosnih karakteristika je prikazan na slici 4.28 i sastoji se iz pobudnog generatora, koji obezbeđuje ulazni napon v_{IN} , i samog pojačavača čija se prenosna karakteristika snima. Sa CH 1 i CH 2 su označena mesta priključivanja sonde osciloskopa kojim se snimanje prenosne karakteristike neposredno viši. Potrebno je podelu vremenske ose osciloskopa postaviti na X–Y, pa će na horizontalnoj osi biti prikazan ulazni napon, a na vertikalnoj izlazni, čime je prenosna karakteristika prikazana. Oblast u kojoj se karakteristika snima određena je podešavanjem pobudnog generatora v_{IN} , njegovom amplitudom i eventualno jednosmernom komponentom.

Kao primer snimanja nelinearne prenosne karakteristike, uzmimo pojačavač snage u klasi B prikazan na slici 4.29. Razumevanje rada pojačavača nije od značaja za ovaj primer, šema je prikazana samo da bi se ilustrovalo da je kolo jednostavno, sastoji se samo od dva tranzistora, da su potrebna dva izvora V_{CC} za napajanje, jedan izvor ulaznog napona v_{IN} za pobudu, a da je kao potrošač vezan otpornik R . Tačke priključivanja sonde su označene na slici 4.29. Vremenski dijagrami ulaznog i izlaznog napona pojačavača su prikazani na slici 4.30. Ne treba da čudi što je amplituda izlaznog napona pojačavača manja od amplitude ulaznog napona, pojačavač je tako projektovan da proširuje strujni kapacitet, a ne da pojačava napon. Prebacivanjem podele vremenske ose na X–Y, od dijagrama sa slike 4.30 se dobija prenosna karakteristika pojačavača snage u klasi B prikazana na slici 4.31, na kojoj se uočava „crossover“ izobličenje u okolini prolazaka ulaznog napona kroz nulu, tipično sa ovu vrstu pojačavača.



Slika 4.29: Pojačavač snage u klasi B: Q1 je BC337, Q2 je BC327, $R = 10\text{ k}\Omega$, $V_{CC} = 15\text{ V}$, $v_{IN} = 2\text{ V} \sin(2\pi 100\text{ Hz } t)$

Snimanje krivih magnećenja feromagnetskih materijala

Jedna od primena osciloskopa koji prikazuje međusobnu zavisnost dva napona je snimanje krivih magnećenja feromagnetskih materijala. Kriva magnećenja predstavlja zavisnost magnetske indukcije B od jačine magnetskog polja H , $B(H)$. Kako bi se ove mikroskopske veličine, vezane za tačku u prostoru, posmatrale i merile pomoću osciloskopa, potrebno ih je na neki način pretvoriti u naponske signale.

U tom cilju potrebno je napraviti uzorak feromagnetskog materijala torusnog oblika i na njemu namotati pobudni namotaj, kako je prikazano na slici 4.32. Pretpostavićemo da je torus poprečnog preseka A , dužine srednje linije l_e , kao i da je dovoljno uzak da se magnetsko polje unutar torusa može smatrati homogenim. Ako je broj navojaka namotaja n , a jačina struje kroz namotaj i_L , prema Amperovom zakonu jačina magnetskog polja je

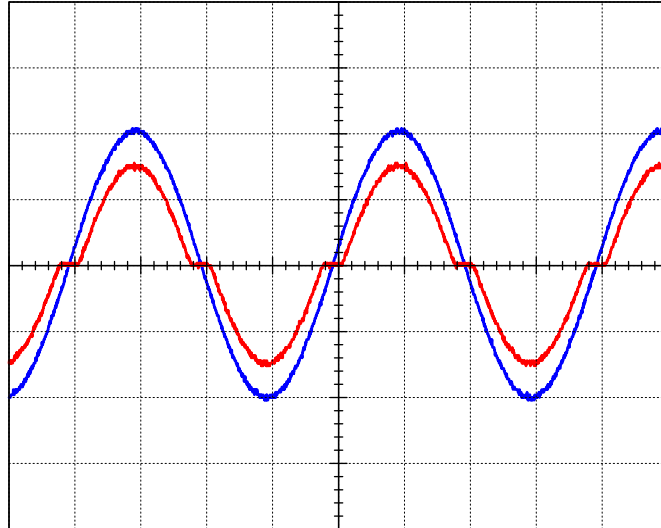
$$H = \frac{n i_L}{l_e} \quad (4.16)$$

čime se merenje jačine magnetskog polja svodi na merenje jačine električne struje.

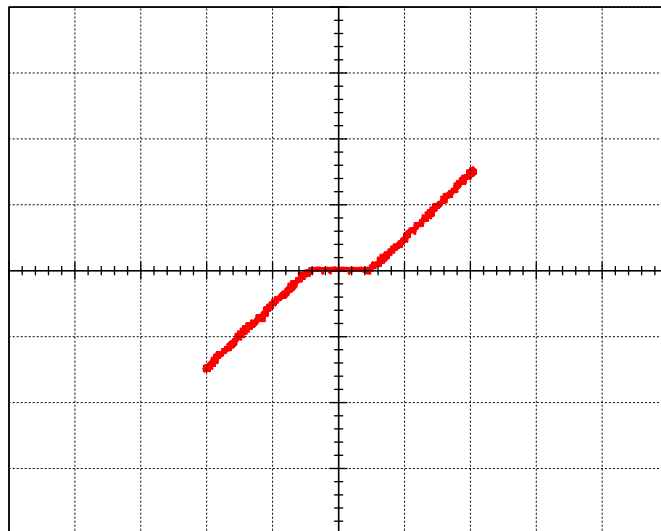
Kako bi se izmerila magnetska indukcija, potrebno je koristiti Faradejev zakon elektromagnetske indukcije prema kome je indukovani napon na krajevima namotaja

$$v_L = \frac{d\lambda}{dt} = n \frac{d\Phi}{dt} = n A \frac{dB}{dt} \quad (4.17)$$

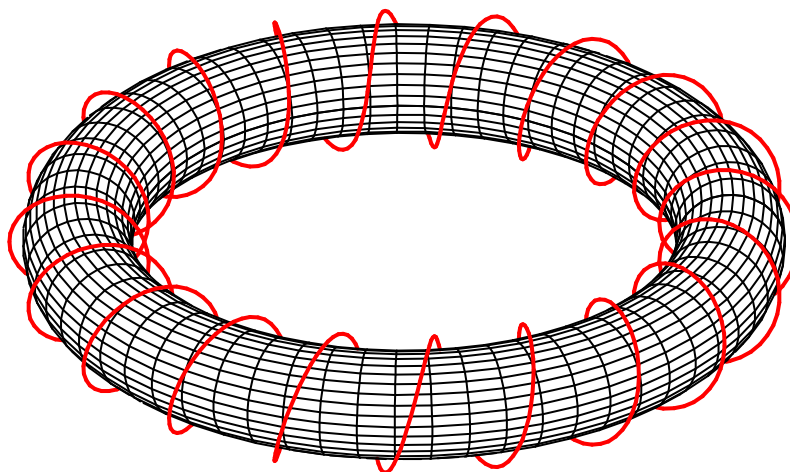
gde je $\Phi = AB$ magnetski fluks u torusnom jezgru, $\lambda = n\Phi$ je fluks obuhvaćen namotajem, a v_L je napon indukovani na krajevima namotaja. Znak $-$ iz Faradejevog zakona je nestao usled promene referentnog smera merenja indukovanog napona kako bi na kalemu bili usaglašeni referentni smerovi struje i napona u skladu sa notacijom



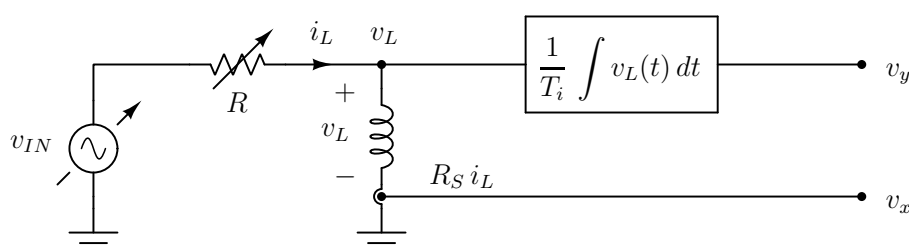
Slika 4.30: Ulazni (plava linija) i izlazni (crvena linija) napon pojačavača snage u klasi B. Podela naponskih osa 1 V/div. Podela vremenske ose 2.5 ms/div.



Slika 4.31: Prenosna karakteristika pojačavača snage u klasi B. Podela naponskih osa 1 V/div.



Slika 4.32: Torusni uzorak materijala sa pobudnim namotajem.



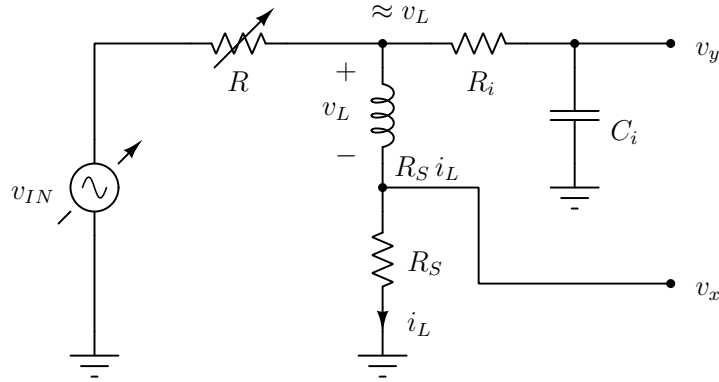
Slika 4.33: Principska šema sistema za snimanje krivih magnećenja.

uobičajenom u teoriji električnih kola. Odavde je

$$B(t) = B(t_0) + \frac{1}{nA} \int_{t_0}^t u(\tau) d\tau \quad (4.18)$$

čime se merenje magnetske indukcije svodi na merenje i integraljenje napona indukovano na namotaju. Kao dodatni problem postavlja se poznavanje početne vrednosti magnetske indukcije, $B(t_0)$, koju merenjem napona nije moguće ustanoviti. Ovo je glavni problem opisanog metoda, a uglavnom se rešava primenom metoda na slučajeve u kojima je srednja vrednost indukcije jednaka nuli, kada je torus pobuđen naizmeničnom strujom velike amplitude, odakle se može odrediti vrednost $B(t_0)$ takva da taj uslov ($B(t) = 0$) zadovoljava. Dakle, fokusiraćemo se na određivanje magnetske indukcije do na konstantu integracije koja ovim merenjem u opštem slučaju neće moći da bude neposredno ustanovljena.

Kako bi se primenio opisani metod, potrebno je realizovati sistem čija je principska šema data na slici 4.33. Sa v_{IN} je označen pobudni generator sinusoidalnog napona, dok je sa R označen otpornik koji ograničava amplitudu struje namotaja. Amplituda napona v_{IN} i/ili otpornost otpornika R mogu se menjati kako bi se regulisala struja namotaja, a time i magnetopobudna sila, odnosno jačina magnetskog polja u torusu. Takođe, označen je i blok integratora koji integrali napon na namotaju kako bi se dobio obuhvaćeni fluks (T_i je konstanta ili pojačanje integratora, ne treba je mešati sa integracionom konstantom), kao i strujni senzor koji struju



Slika 4.34: Sistem za snimanje krivih magnećenja sa jednim namotajem.

kalema pretvara u njoj proporcionalan napon. Izlazni naponi sistema,

$$v_x = R_S i_L = R_S \frac{l_e}{n} H \quad (4.19)$$

i

$$v_y = \frac{1}{T_i} v_L(t) dt = \frac{n A}{T_i} B \quad (4.20)$$

su proporcionalni jačini magnetskog polja i magnetskoj indukciji, pa će na ekranu osciloskopa biti prikazana kriva magnećenja posmatranog feromagnetskog materijala.

Kako bi snimanje bilo izvršeno, blok šema sa slike 4.33 treba da bude realizovana korišćenjem realnih i dostupnih komponentata. Najjednostavnije rešenje za senzor struje je šant, otpornik R_S , kako je prikazano na slici 4.34. Integrator je najlakše realizovati aproksimativno, korišćenjem kola za integraljenje koje se sastoji iz otpornika R_i i kondenzatora C_i . U kompleksnom domenu takvo kolo je karakterisano funkcijom prenosa

$$H_{ri}(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega R_i C_i} \quad (4.21)$$

dok je idealna karakteristika integratora sa slike 4.33 data funkcijom prenosa

$$H_{ii}(j\omega) = \frac{1}{j\omega T_i}. \quad (4.22)$$

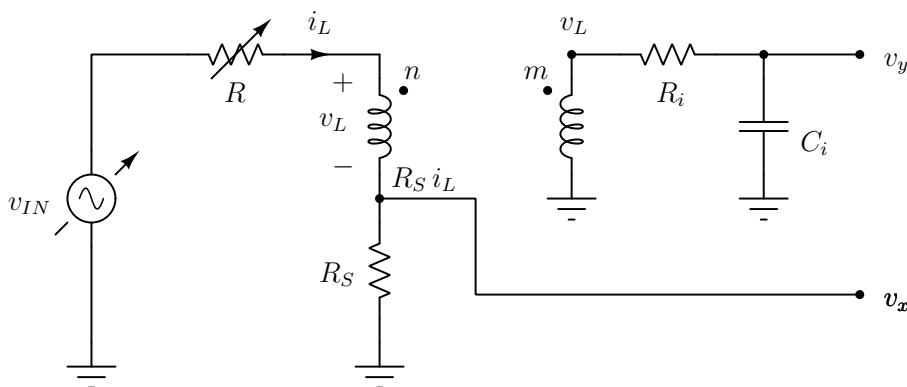
Funkcija prenosa $H_{ri}(j\omega)$ dobro aproksimira $H_{ii}(j\omega)$ ako je

$$1 \ll \omega R_i C_i \quad (4.23)$$

i tada je

$$H_{ri}(j\omega) \approx \frac{1}{j\omega R_i C_i} \quad (4.24)$$

pa je $T_i = R_i C_i$. Stoga, treba voditi računa da vremenska konstanta integratora T_i bude dovoljno velika da na frekvenciji pri kojoj se posmatranje krive magnećenja vrši važi $\omega T_i \gg 1$.



Slika 4.35: Sistem za snimanje krivih magnećenja sa dva namotaja.

Na ovaj način je postignuto

$$H(t) = \frac{n}{R_S l_e} v_x(t) \quad (4.25)$$

i

$$B(t) = \frac{R_i C_i}{n A} v_y(t) \quad (4.26)$$

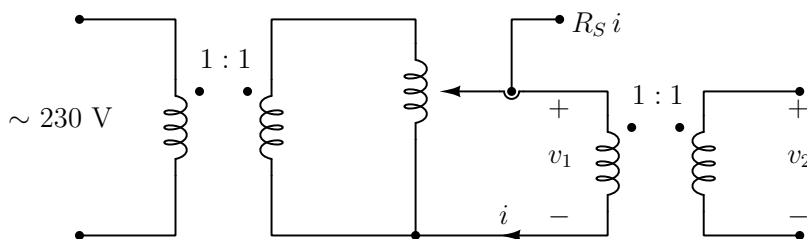
pa će na ekranu biti prikazana željena kriva magnećenja kada se eliminiše vreme posmatranjem dijagrama sa podelom vremenske ose postavljenom na X–Y.

Na ovom mestu valja skrenuti pažnju na jedan parazitni efekat koji izobličuje dobijene krive magnećenja i prikazuje „lažne gubitke u jezgru“. U pitanju je pad napona na šantu R_S i omski pad napona na pobudnom namotaju koji je u dosadašnjoj analizi bio zanemaren. Kako bi se ovi neželjeni efekti izbegli, moguće je razdvojiti namotaj za pobudu jezgra, kroz koji može da protiče značajna struja i da pravi nezamerni omski pad napona i namotaj za praćenje fluksa u jezgru, kroz koji tada teče zanemarivo mala struja potrebna integratoru. Ovo je prikazano na slici 4.35, gde je namotaj sa n navojaka pobudni, a namotaj sa m navojaka služi za praćenje fluksa u jezgru. Jednačina (4.25) i dalje važi u neizmenjenoj formi, a kako je broj navojaka na namotaju za praćenje fluksa m , jednačina (4.26) se menja u

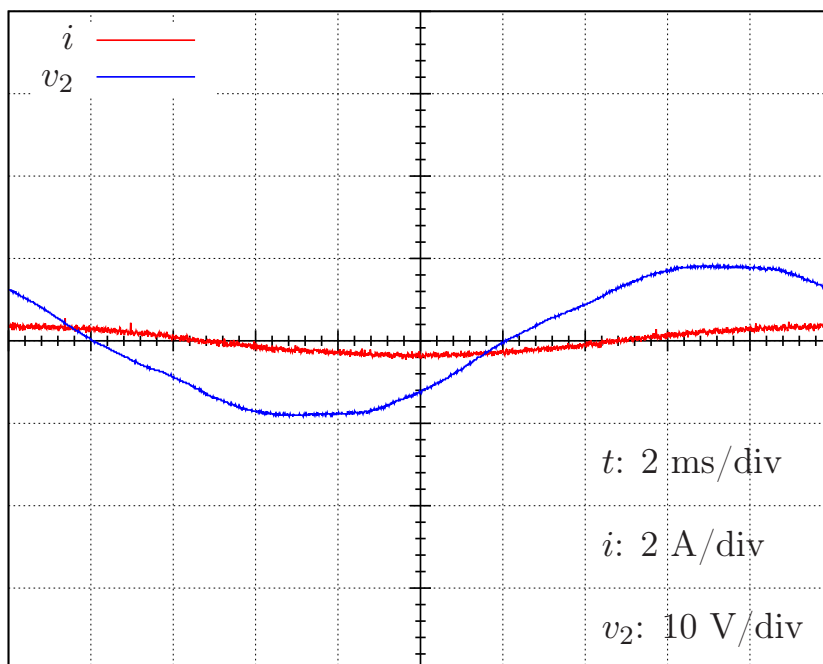
$$B(t) = \frac{R_i C_i}{m A} v_y(t). \quad (4.27)$$

Primer snimanja krivih magnećenja primenom digitalnog osciloskopa

U cilju ilustrovanja opisanog metoda za snimanje krivih magnećenja feromagnet-skih materijala, realizovan je sistem za snimanje krive magnećenja jezgra mrežnog transformatora, prikazan na slici 4.36. Razmatrani mrežni transformator osim primarnog namotaja namenjenog priključenju na mrežni napon efektivne vrednosti 230 V ima i dva sekundarna namotaja za napon efektivne vrednosti 12 V koji su veoma dobro upareni i spregnuti, pa su iskorišćeni za snimanje krive magnećenja. Sistem sa slike 4.36 je u osnovi sistem za snimanje krive magnećenja sa dva namotaja



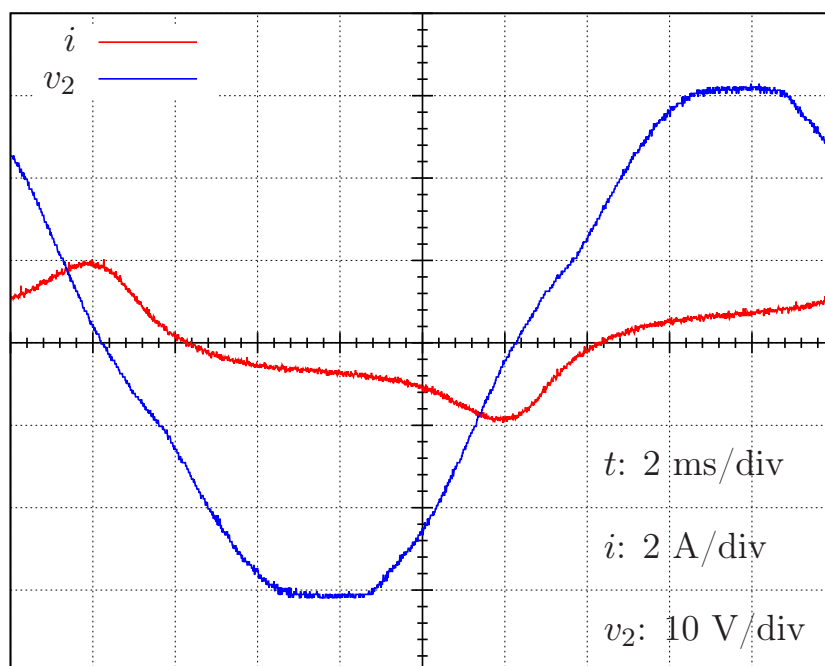
Slika 4.36: Sistem za snimanje krivih magnećenja jezgra mrežnog transformatora.



Slika 4.37: Struja magnetizacionog i napon mernog namotaja; amplituda struje 0.1 A.

sa slike 4.35, ali je prilagođen raspoloživoj opremi: umesto promenljivog otpornika R sa slike 4.35 se za promenu napona koristi varijacioni transformator (varijak), merenje struje se vrši strujnom sondom umesto otpornikom R_S , jer je strujna sonda raspoloživa, a integraljenje sekundarnog napona v_2 se vrši numerički, pa je analogni integrator koji na šemi sa slike 4.35 čine otpornik R_i i kondenzator C_i izostavljen. Numerička obrada i dokumentovanje snimljenih dijagrama je omogućeno primenom digitalnog osciloskopa, sa koga se podaci prenesu na personalni računar gde se dalje obrađuju. Kako bi rad sa sistemom bio bezbedan, primenjen je razdvojni 1 : 1 transformator za spregu sa mrežom.

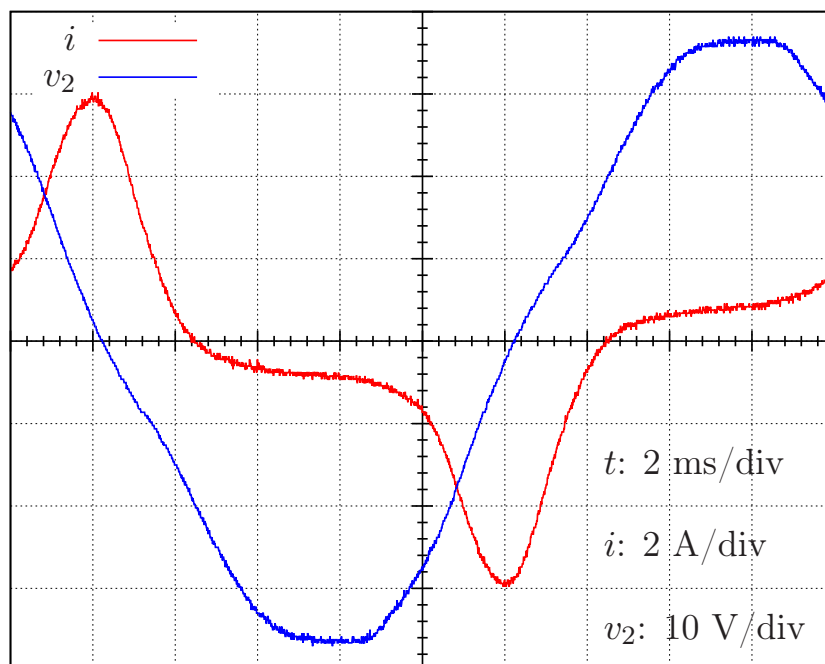
Snimanje krivih magnećenja je izvršeno za nekoliko vrednosti amplitude struje magnetizacionog namotaja, od kojih su ovde prikazani slučajevi sa amplitudom struje magnetizacije od 0.1 A, 0.5 A i 1.5 A. Prvo su snimljeni dijagrami struje i magnetizacionog namotaja i napona v_2 mernog namotaja i oni su za navedene amplitude struje magnetizacionog namotaja prikazani na slikama 4.37, 4.38 i 4.39.



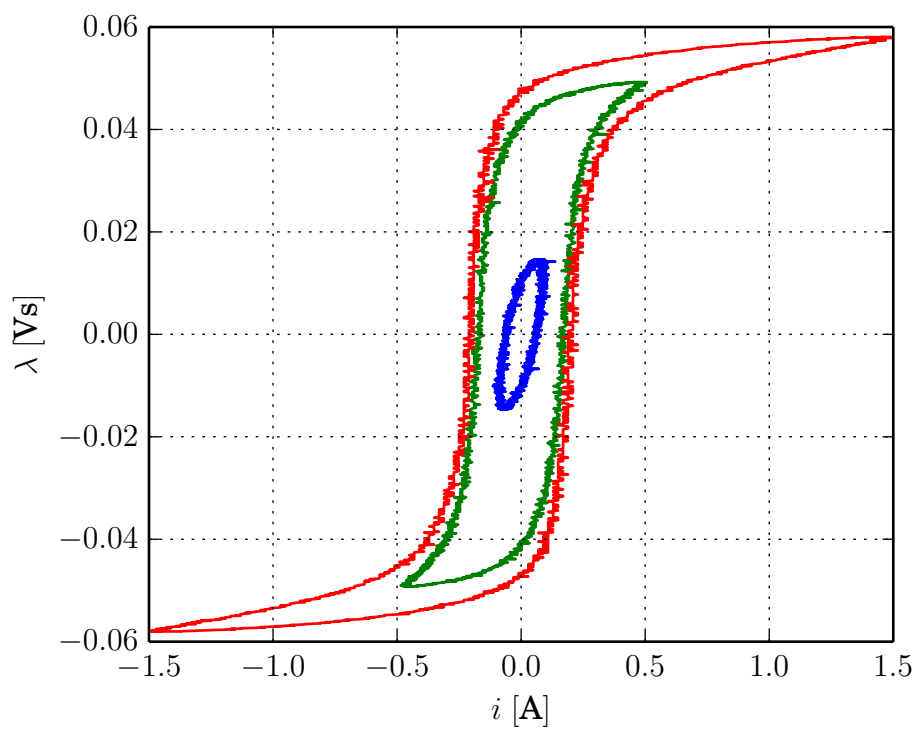
Slika 4.38: Struja magnetizacionog i napon mernog namotaja; amplituda struje 0.5 A.

Odabiranje je primenom digitalnog osciloskopa vršeno sa vremenskim korakom $\Delta t = 10 \mu s$, tako da je po periodi mrežnog napona sakupljeno 2000 odbiraka. Iz nizova dobijenih odbiraka za struju magnetizacionog i napon mernog namotaja su prvo numerički uklonjene jednosmerne komponente koje su posledica ofseta u mernom sistemu. Potom je primenom pravougaonog pravila numeričke integracije dobijen fluks mernog namotaja iz koga je uklonjena jednosmerna komponenta numerički, što je ekvivalentno postavljanju konstante integracije pod pretpostavkom da se jezgro simetrično magneti. Opisani metod snimanja karakteristike magnećenja ne može da otkrije eventualnu jednosmernu komponentu indukcije u jezgru, pošto se meri njen izvod u vremenu, pa je metod ograničen na snimanje simetričnih karakteristika. Dobijene krive magnećenja jezgra su prikazane na slici 4.40, gde plava kriva odgovara radu jezgra u približno linearnom režimu, zelena pokazuje jasne znake nelinearnosti i zasićenja, dok crvena odgovara radu u dubokom zasićenju.

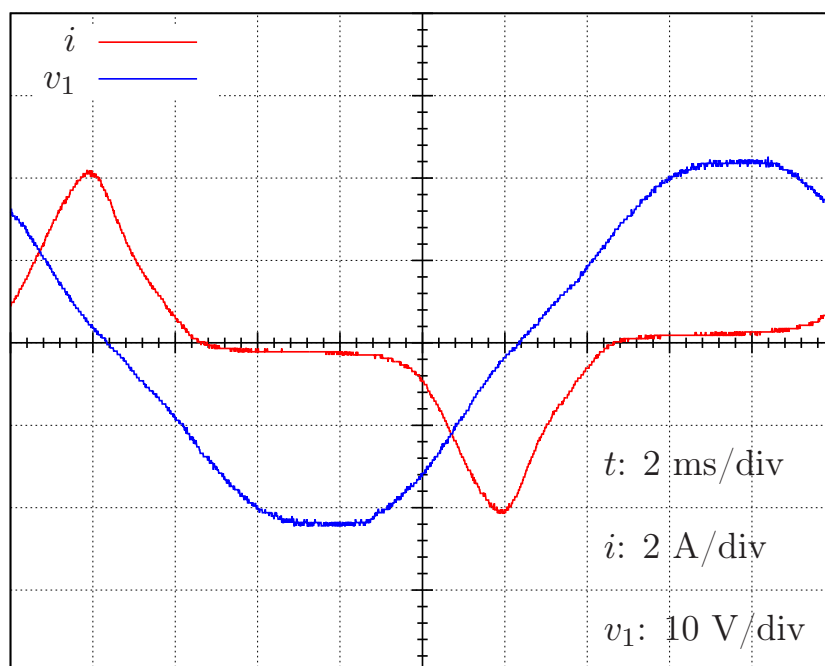
U cilju ilustrovanja razlike između sistema za snimanje magnetizacionih krivih koji koristi jedan namotaj, prikazanog na slici 4.34, i sistema sa dva namotaja, prikazanog na slici 4.35, u kolu sa slike 4.36 su pri istim uslovima snimljeni naponi pobudnog namotaja v_1 i mernog namotaja v_2 , radi poređenja. Izabrana je pobuda koja odgovara dubokom zasićenju jezgra, sa amplitudom struje od 4 A, kako bi posmatrani efekti bili izraženiji. Dobijeni vremenski dijagrami su prikazani na slikama 4.41 i 4.42, a naponi na magnetizacionom i mernom namotaju su upoređeni na slici 4.43. Na dijagramima sa slike 4.43 se uočava razlika u naponima uzrokovana padom napona na mernom namotaju. Numeričkom obradom je dobijena razlika napona



Slika 4.39: Struja magnetizacionog i napon mernog namotaja; amplituda struje 1.5 A.

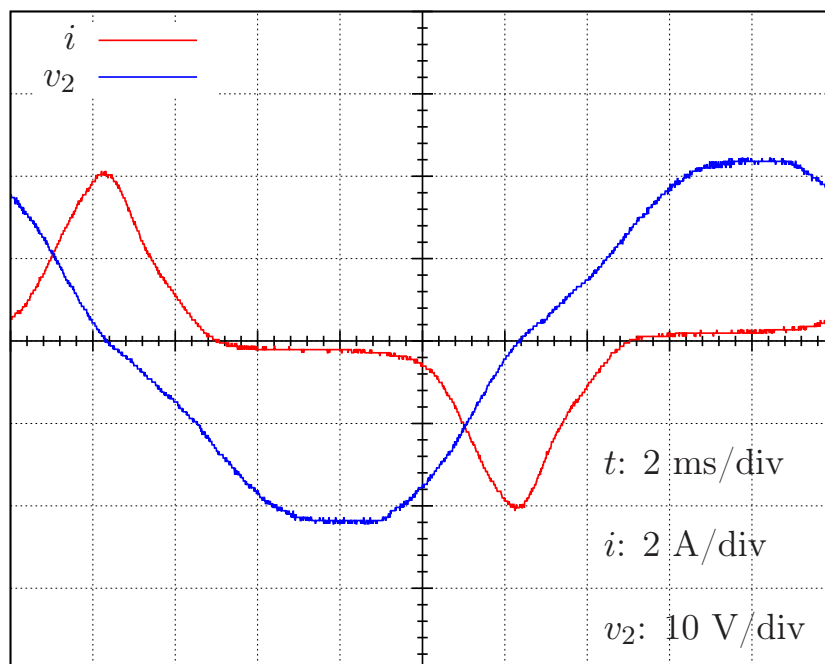


Slika 4.40: Krive magnećenja jezgra.

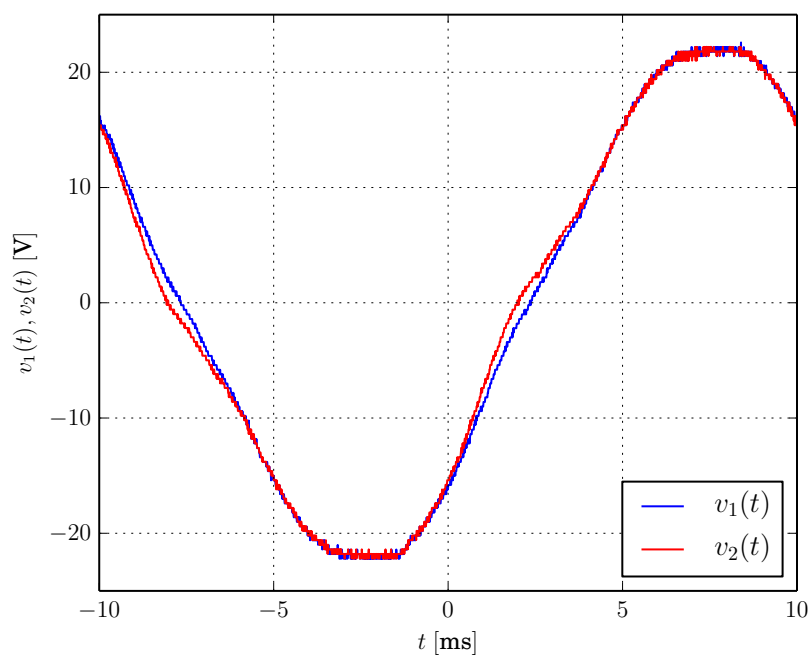


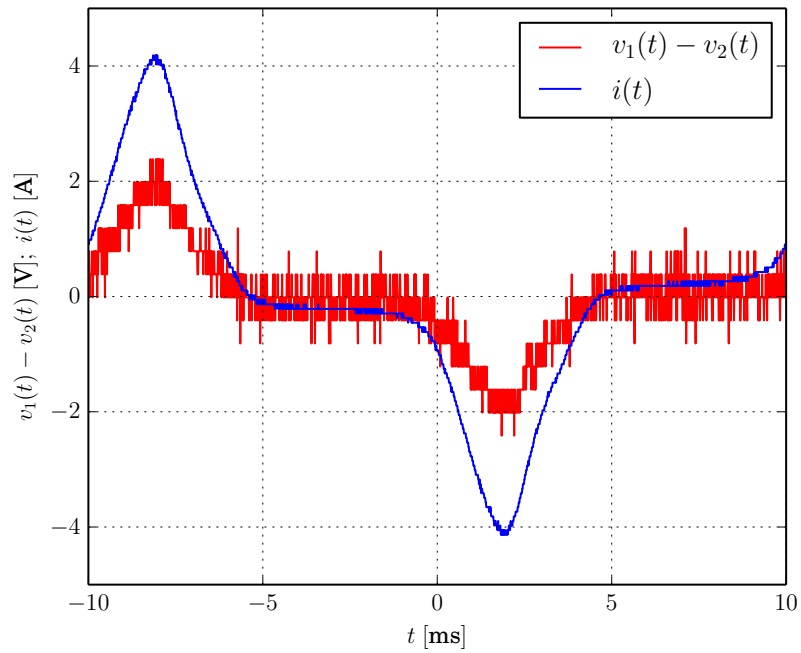
Slika 4.41: Struja i napon magnetizacionog namotaja; amplituda struje 4 A.

pobudnog i mernog namotaja, koja po pretpostavci odgovara omskom padu napona na mernom namotaju, prikazana na slici 4.44 zajedno sa vremenskim dijagramom struje pobudnog namotaja. Iako su u razlici napona $v_1 - v_2$ vidni efekti kvantizacije, uočava se jasna korelacija između $v_1 - v_2$ i struje magnetizacionog namotaja. Međusobna zavisnost $v_1 - v_2$ i struje magnetizacionog namotaja je prikazana na slici 4.45. Dobijeni rezultati merenja su iskorišćeni za određivanje otpornosti pobudnog namotaja metodom najmanjih kvadrata i dobijena je otpornost od $R_{est} = 0.4618 \Omega$. Na slici 4.45 je prikazana i zavisnost napona $R_{est} i$ od struje magnećenja i , koja je u dobroj saglasnosti sa razlikom napona $v_1 - v_2$.

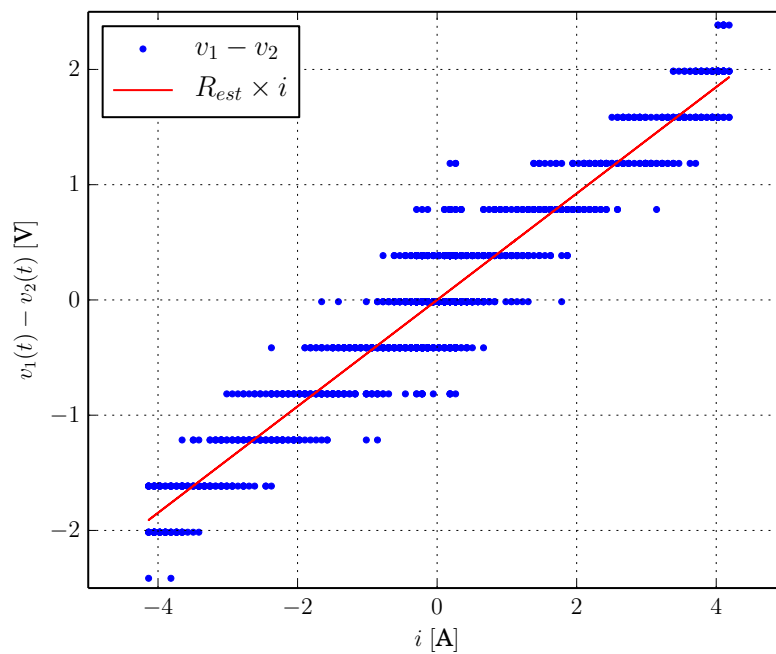


Slika 4.42: Struja magnetizacionog i napon mernog namotaja; amplituda struje 4 A.

Slika 4.43: Napon na magnetizacionom namotaju, v_1 , i napon na mernom namotaju, v_2 .



Slika 4.44: Merenje otpornosti namotaja, vremenski dijagrami.



Slika 4.45: Rezultati merenja otpornosti i procenjena otpornost.

Problem sa uzemljenjem

Na kraju ovog priručnika će biti pomenut problem koji svakako zaslužuje posebno poglavlje. Iako je problem teorijski minoran, njegovo zanemarivanje u praksi je dovelo do brojnih uništenja osciloskopskih sonda, uređaja na kojima je merenje vršeno, kao i samih osciloskopa. Ovakva neslavna reputacija je dovela do posvećivanja posebnog poglavlja problemu sa uzemljenjem. Za referentni potencijal se u laboratorijskom žargonu često koristi termin „masa“. Čvor sa referentnim potencijalom može, a ne mora, biti vezan za uzemljenje.

U čemu je, zapravo, problem? Osciloskop prema raznim standardima mora biti uzemljen kako bi se smanjila opasnost od električnog udara kojoj bi mogao biti izložen rukovaoc. To znači da se osciloskop na mrežu priključuje preko kabla i utikača koji ima priključak za uzemljenje (tzv. „šuko“ utikač). Pod uslovom da je uzemljenje ispravno izvedeno (da nije provodnik uzemljenja presečen), na potencijalu uzemljenja se nalazi kutija osciloskopa i sve pristupačne komande osciloskopa, pa je osciloskop bezbedan za rad.

Sonde osciloskopa imaju dva priključka, jedan za posmatrani signal i jedan za povezivanje na referentni potencijal, tzv. „masu“. Od suštinskog je značaja napomenuti da su priključci za referentni potencijal obe osciloskopske sonde na istom potencijalu, tj. da su međusobno povezani ututar osciloskopa i uz to povezani na potencijal uzemljenja. Dakle, dvokanalnim osciloskopom se ne mogu posmatrati dva nezavisna napona, već dva nezavisna potencijala u odnosu na isti referentni potencijal koji je jednak potencijalu uzemljenja.

Pretpostavimo da uređaj na kome se merenje vrši nije uzemljen. Povezivanje priključaka za referentni potencijal („masu“) sa dve sonde u taj uređaj izaziva međusobno kratko spajanje čvorova na koje su priključci za referentni potencijal vezani. Situacija je još složenija u slučaju da je posmatrani uređaj uzemljen. U tom slučaju priključivanje dva priključka za referentni potencijal sonda izaziva međusobno kratko spajanje čvorova na koje su priključci vezani, kao i njihovo vezivanje na potencijal uzemljenja, koji je u uređaju već prisutan pošto je i on uzemljen. Ovolika količina kratkih spojeva obično ne ostavlja osciloskopske sonde (priključke za „masu“) i/ili uređaj na kome se merenje vrši neoštećenim. Nešto ređe se oštećenje prenosi i na sam osciloskop.

Neka za primer posluži jednostavno kolo prikazano šemom 5.1.A na slici 5.1. Pod pretpostavkom da su svi otpornici jednakih otpornosti $R_1 = R_2 = R_3 = 1 \text{ k}\Omega$ i da je generator ulaznog napona $v_{IN} = 3 \text{ V} \cos(\omega t)$, naponi koji se mogu meriti na otpornicima će biti $u_{R,k} = \pm 1 \text{ V} \cos(\omega t)$, gde znak zavisi od orijentacije merenja napona. Na tri otpornika moguće je definisati šest napona, po dve orijentacije napona na svakom otporniku. Snage disipacije na otpornicima su $P_1 = P_2 = P_3 =$

0.5 mW. Takođe, pretpostavimo da je uređaj uzemljen kako je prikazano.

Na šemi 5.1.B je prikazan prvi način priključivanja sonde osciloskopa. Pokaziva-nje instrumenta će biti tačno, na ekranu će se videti napon $u_B = 1 \text{ V} \cos(\omega t)$. Struja koju daje generator kolu će biti $i_{IN} = 1 \text{ mA} \cos(\omega t)$, kako je i planirano, a disipacija na svakom od otpornika će biti $P_1 = P_2 = P_3 = 0.5 \text{ mW}$. Nikakvih oštećenja neće biti.

Priključivanje sonde na način prikazan na slici 5.1.C će dovesti do promene raspodele napona i struja u kolu pošto uslovljava $v_3 = 0$. Poslednji otpornik u nizu, R_3 , će biti kratko spojen i na osiloskopu će se videti napon jednak nuli, $u_C = 0$. Zbog kratkog spajanja otpornika R_3 , struja koju generator daje kolu će porasti na $i_{IN} = 1.5 \text{ mA} \cos(\omega t)$, a disipacija na otpornicima R_1 i R_2 će porasti na $P_1 = P_2 = 1.125 \text{ mW}$, što je povećanje od 2.25 puta. Pošto je disipirana snaga mala, u ovom konkretnom slučaju ne treba očekivati pregorevanje otpornika, ali u sličnim situacijama sa manjom marginom snage moguća je pojava pregorevanja elemenata usled modifikacije kola priključivanjem sonde. Disipacija na otporniku R_3 će modifikacijom kola usled priključenja sonde biti svedena na $P_3 = 0$.

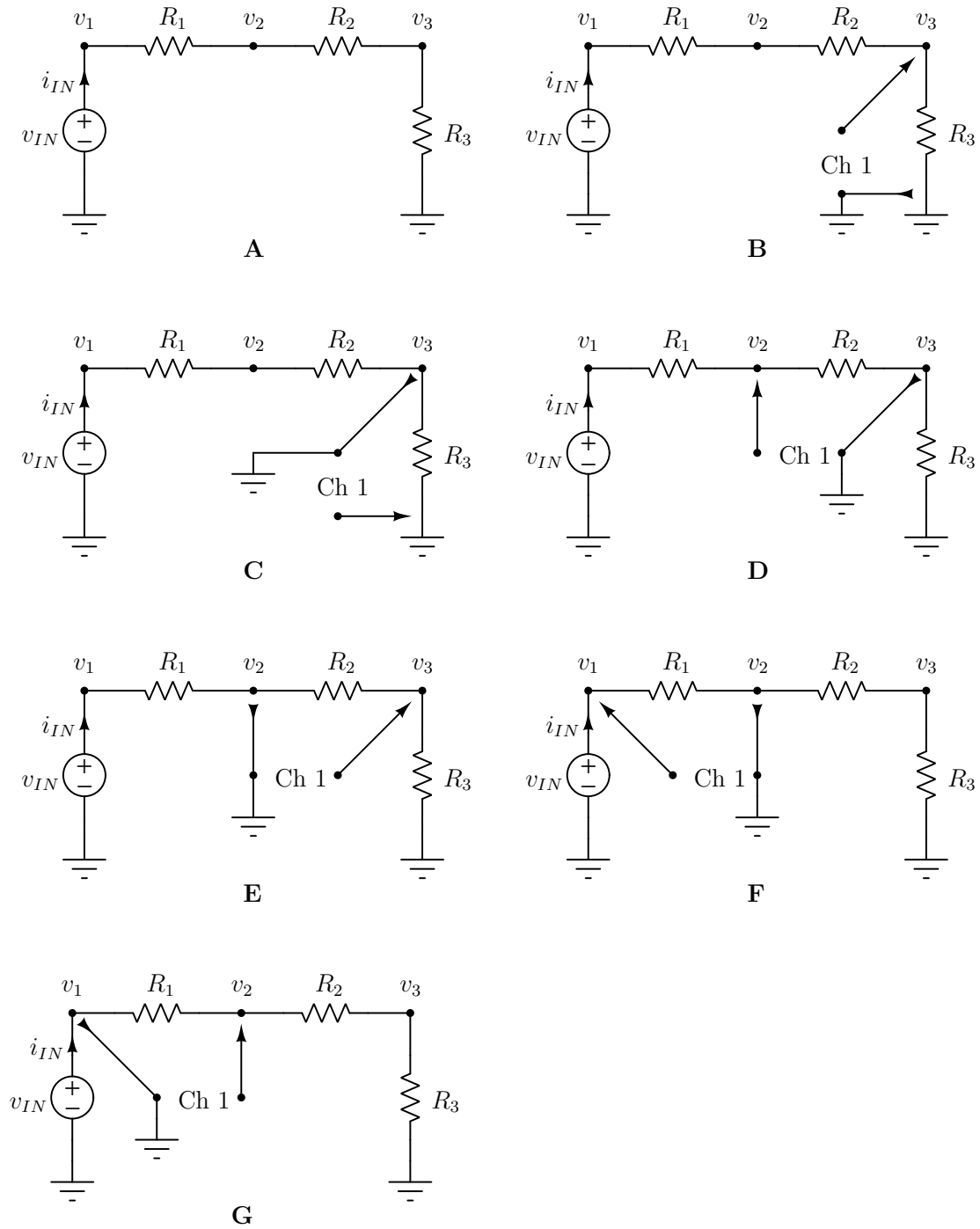
Priključivanje sonde na način prikazan na slici 5.1.D će opet dovesti do opisane promene raspodele napona, struja i disipacija u kolu, pošto je masa sonde osciloskopa priključena na isto mesto, pa je isti čvor time doveden na referentni potencijal, na potencijal uzemljenja. Poslednji otpornik u nizu će biti kratko spojen i na osiloskopu će se videti napon oblika $u_D = 1.5 \text{ V} \cos(\omega t)$.

U slučaju priključivanja sonde osciloskopa na način prikazan na slici 5.1.E, doći će do još većeg poremećaja u raspodeli napona, struja i disipacija u kolu. Poslednja dva otpornika će biti „kratko spojena“, a na osciloskopu će se videti napon jednak nuli. Struja koju generator daje kolu će biti $i_{IN} = 3 \text{ mA} \cos(\omega t)$, a disipacija na otporniku R_1 će biti $P_1 = 4.5 \text{ mW}$, što je vrednost devet puta veća od projektovane! Isto tako, snaga koju generator daje kolu je devet puta veća u odnosu na situaciju kada sonda nije bila priključena. Disipacije na otpornicima R_2 i R_3 su svedene na $P_2 = P_3 = 0$. Napon prikazan na ekranu osciloskopa će biti $u_E = 0$.

Isti poremećaj u radu kola će se dogoditi i u slučaju priključivanja sonde na način prikazan na slici 5.1.F, samo će sada na osciloskopu biti prikazan dijagram napona $u_F = 3 \text{ V} \cos(\omega t)$.

Konačno, dolazimo do slučaja sa slike 5.1.G. Za ovo kolo teorija električnih kola nema rešenje, pošto je sistem jednačina koje kolo opisuju kontradiktoran: karakteristika naponskog izvora kaže da je njegov napon $3 \text{ V} \cos(\omega t)$, a karakteristika sonde koja kratko spaja izvor kaže da je njegov napon jednak nuli. Stoga, stvaran napon na ekranu osciloskopa se može odrediti tek uzimanjem u obzir efekata koji do sada nisu bili uključeni u model: unutrašnje otpornosti generatora i otpornosti priključka za masu sonde. U praksi, za tipične vrednosti ovih parazitnih elemenata pri razmatranom nivou snage, na osciloskopu bi valjalo očekivati da bude prikazan napon blizak nuli i znatan rast struje i_{IN} i snage koju generator daje kolu, a koja mora negde da se disipira. Međutim, izgledi su da to neće dugo trajati. Pošto je naponski izvor kratko spojen, od snage izvora zavisi hoće li pregoreti sondin priključak za referentni potencijal („masu“), izvor, osciloskop, svi zajedno, ili neka druga kombinacija pomenutih elemenata, što može da proizvede neprijatan i uznemirujući prasak.

Razmatrani slučajevi povezivanja sonde u kolo su rezimirani u Tabeli 5.1, gde su



Slika 5.1: Različiti načini priključivanja sonde osciloskopa.

Tabela 5.1: Amplituda I_m ulazne struje $i_{IN}(t) = I_m \cos(\omega t)$, amplituda U_m izmirenog napona $u(t) = U_m \cos(\omega t)$ i snage na otpornicima P_1 , P_2 i P_3 .

slučaj	I_m [mA]	U_m [V]	P_1 [mW]	P_2 [mW]	P_3 [mW]
A	1	—	0.5	0.5	0.5
B	1	1	0.5	0.5	0.5
C	1.5	0	1.125	1.125	0
D	1.5	1.5	1.125	1.125	0
E	3	0	4.5	0	0
F	3	3	4.5	0	0
G	$\rightarrow \infty$?	?	?	?

prikazani amplituda I_m ulazne struje kola, amplituda U_m izmirenog napona i snage disipacije na otpornicima R_1 , R_2 i R_3 , označene sa P_1 , P_2 i P_3 .

Iako je problem teorijski trivijalan, nepažnja u radu i zanemarivanje njegovog praktičnog značaja često dovode do velikih šteta u laboratoriji.

Literatura

- [1] Tektronix 2215A Oscilloscope Operators Instruction Manual, Tektronix, Inc., 1984.
- [2] Tektronix 2205 Oscilloscope Operator's Manual, Tektronix, Inc., 1987.
- [3] Tektronix TDS 210 and TDS 220 Digital Real-Time Oscilloscopes User Manual, Tektronix, Inc., 1997.
- [4] TPS 2000 Series Digital Storage Oscilloscope User Manual, Tektronix, Inc.
- [5] Tektronix TDS 200-Series Digital Real-Time Oscilloscopes Programmer Manual, Tektronix, Inc.
- [6] Predrag Pejović, Energetska elektronika 2, laboratorijske vežbe
online: <http://tnt.etf.bg.ac.rs/~ms1ee2>
- [7] Predrag Pejović, Atlas Lisažuovih figura — određivanje faznog stava,
online: <http://tnt.etf.bg.ac.rs/~oe2em/lissajous-phase.pdf>
- [8] Predrag Pejović, Atlas Lisažuovih figura — određivanje odnosa frekvencija,
online: <http://tnt.etf.bg.ac.rs/~oe2em/lissajous-multitone.pdf>
- [9] Predrag Pejović, Atlas Lisažuovih figura — degenerisane krive,
online: <http://tnt.etf.bg.ac.rs/~oe2em/lissajous-degenerate.pdf>

CIP - Каталогизација у публикацији - Народна библиотека Србије, Београд

621.317.755(035)(0.034.2)

ПЕЈОВИЋ, Предраг, 1966-

Princip rada i primena osciloskopa [Elektronski izvor] : priručnik za rad u laboratoriji : [elektronski udžbenik] / Predrag Pejović. - Beograd : Elektrotehnički fakultet Univerziteta, 2016 (Beograd : P. Pejović). - 1 elektronski optički disk (DVD) ; 12 cm

Sistemska zahteva: Nisu navedeni. - Nasl. sa naslovne strane dokumenta. - Tiraž 50. - Sadrži bibliografiju.

ISBN 978-86-7225-060-2

а) Осцилографи - Приручници
COBISS.SR-ID 225253388
