

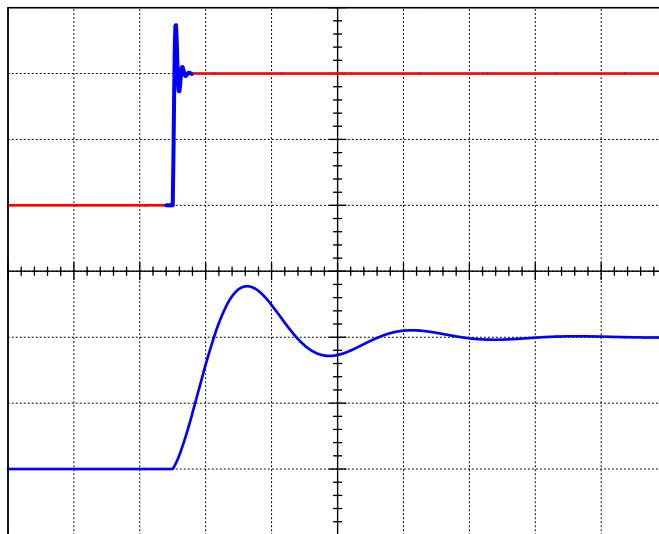


Slika 2.12: Komande za kontrolu vremenske baze osciloskopa.

ne vidi).

Kako je nagovešteno, jedna od specifičnosti osciloskopa Tektronix 2215A jeste postojanje dva sistema za horizontalno skretanje mlaza. Drugi sistem je pomoći (u laboratorijskom slengu „B trigger“) i služi sa isticanje detalja sa vremenskog dijagrama koji se posmatra u drugoj, detaljnijoj podeli vremenske ose. Primer takvog posmatranja signala je prikazan na slici 2.13, gde je uzlazna ivica signala prikazana sa drugom razmerom vremenske ose na istom dijagramu, primenom drugog sistema za horizontalno skretanje mlaza. Oba sistema za skretanje mlaza su zasnovana na istom principu, 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. Potenciometrom označenim sa A/B SWP SEP (A/B SWeeP SEParation) se podešava vertikalni položaj slike sa pomoćnog sistema u odnosu na sliku sa osnovnog sistema, pa je zato ova komanda grupisana sa ostalim komandama za kontrolu vertikalne ose na slici 2.9, i ima efekat sličan okretanju potenciometra POSITION na sistemu za vertikalno skretanje mlaza. Preklopnikom HORIZONTAL MODE, sa položajima A, ALT i B se bira sistem za horizontalno skretanje mlaza. Položaj A odgovara osnovnom sistemu, položaj ALT naizmenično iscrtava sliku sa osnovnog i sa pomoćnog sistema, dok položaj B kontrolu horizontalnog skretanja mlaza predaje pomoćnom sistemu. Potenciometar sa metalnim dugmetom i brojačem označen sa B DELAY TIME POSITION kontroliše vreme koje protekne od početka iscrtavanja slike po osnovnom sistemu za horizontalno skretanje, do početka iscrtavanja slike po pomoćnom sistemu. To vreme se



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 po-deoka vremenske ose. Ako se preklopnik HORIZONTAL MODE nalazi u položaju ALT, deo krive koju iscrtava osnovni sistem za horizontalno skretanje, a prikazuje ga pomoći sistem, je pojačanog intenziteta, “highlighted” (ili u laboratorijskom slengu „hajljatovan“), što je ilustrovano plavim delom na crvenoj krivoj na slici 2.13.

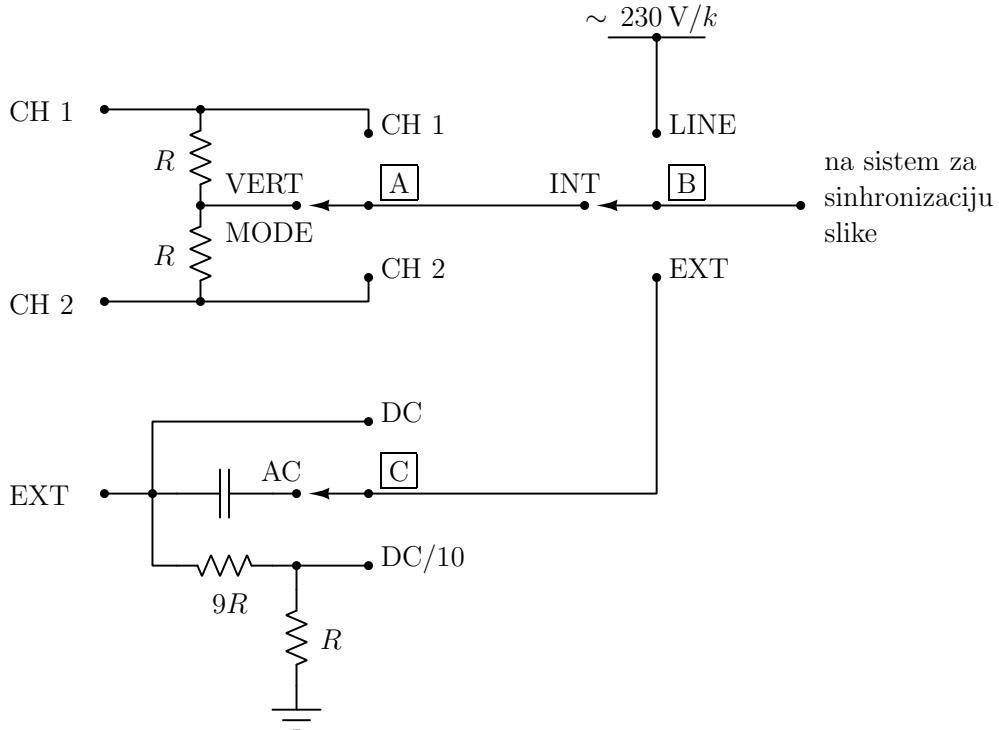
Krajnji levi položaj preklopnika za podešavanje podele vremenske ose, označen sa X—Y (ispisano na crnoj podlozi, delimično zaklonjeno), odgovara levom položaju preklopnika B sa blok šeme osciloskopa prikazane na slici 2.6. Time se kontrola horizontalnog skretanja elektronskog mlaza sa generatora linearne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

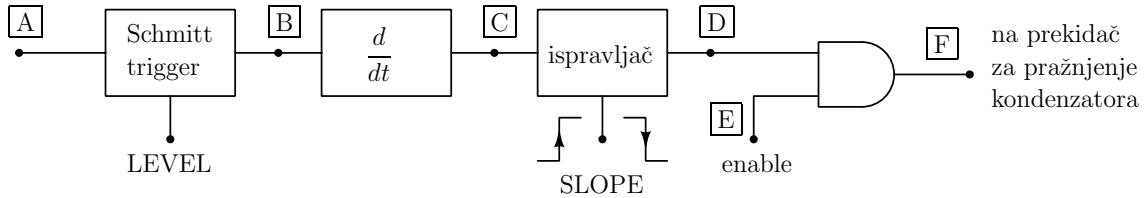
Prvi korak u sinhronizaciji slike jeste izbor sinhronizacionog signala. Principska



Slika 2.14: Preklopnići 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 stavnog 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 iscrtavanje signala sa kanala 1 kanal 1 daje sinhronizacioni signal, dok za iscrtavanje 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 iscrtava. 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 direktni 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 spoljni 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 prepostavljeni 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.

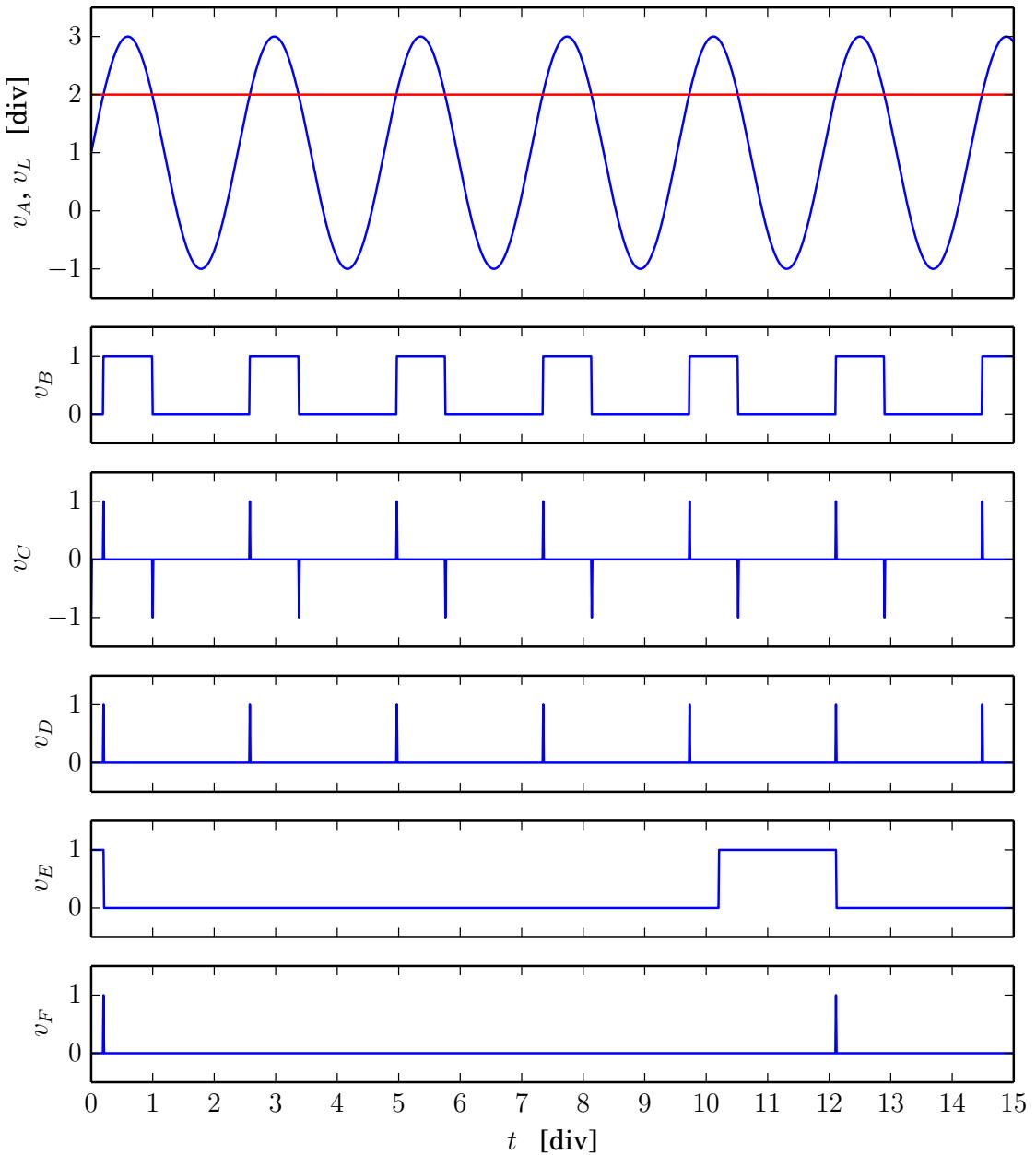
Signalni se iz diferencijatora vode na blok za ispravljanje i selekciju impulsa. Na izlasku iz tog bloka se nalazi ili povorka pozitivnih impulsa iz diferencijatora (uklojeni negativni impulsi) ili povorka ispravljenih negativnih impulsa (negativnim impulsima promenjen znak, pozitivni impulsi sa ulaza 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 iscrtavanje slike vraća na početak tek kada je iscrtan 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 iscrtavanja slike i obaranje enable signala na 0, dok elektronski snop ponovo ne pređe ceo ekran.

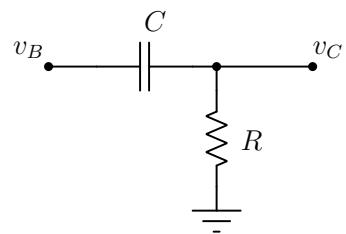
Trenutak povratka na početak novog iscrtavanja slike je određen uključivanjem prekidača koji prazni kondenzator u generatoru linearne vremenske baze i vraća napon v_x na V_{x0} . Signal za uključivanje prekidača se dobija na izlazu kola za sinhronizaciju slike, čime se ceo krug stvaranja slike na osciloskopu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

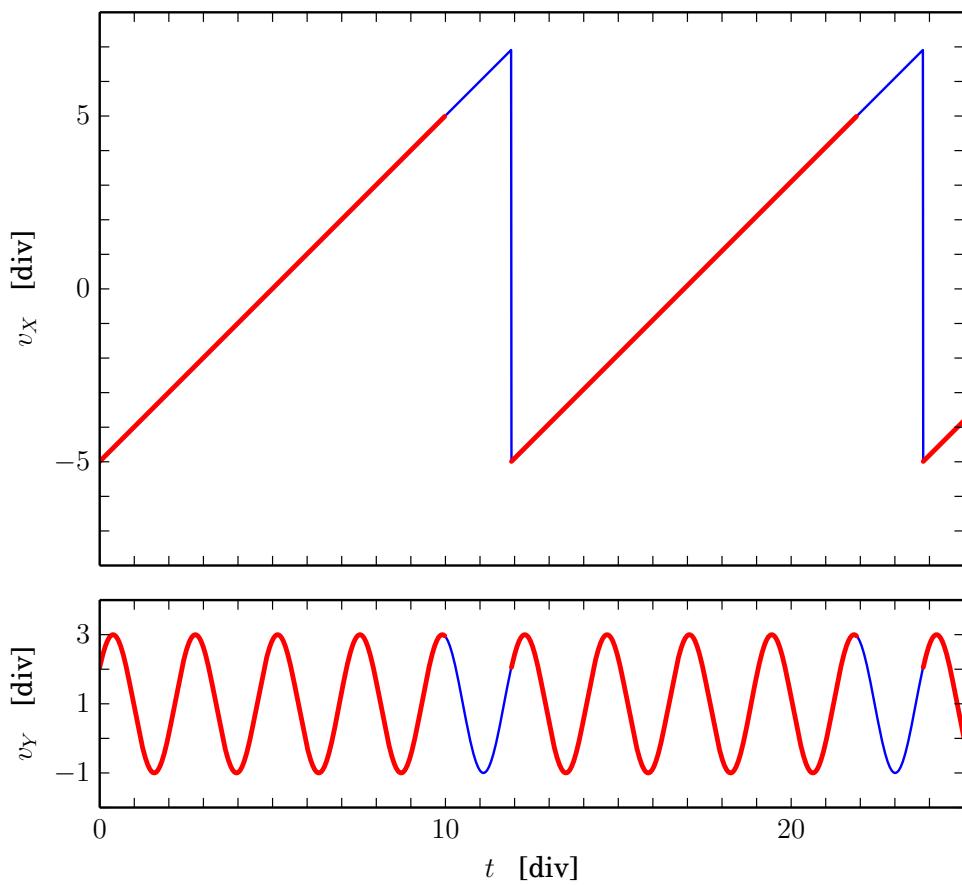
U slučaju da je osnovni napon V_{x0} sistema za horizontalno skretanje postavljen na -6 div, naponi v_X i v_Y su prikazani na slici 2.20, dok je rezultujuća slika koja se prikazuje na ekranu osciloskopa prikazana na slici 2.21. Za razliku od slučaja kada je bilo $V_{x0} = -5$ div, u ovom slučaju i sa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



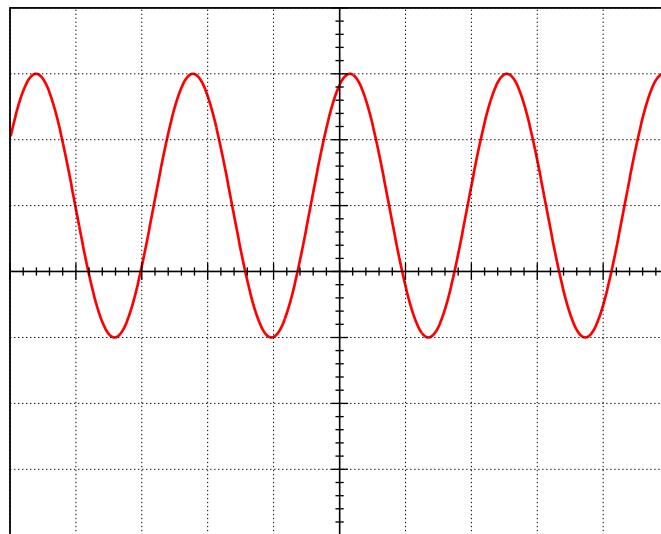
Slika 2.16: Signalni koli za sinhronizaciju slike.



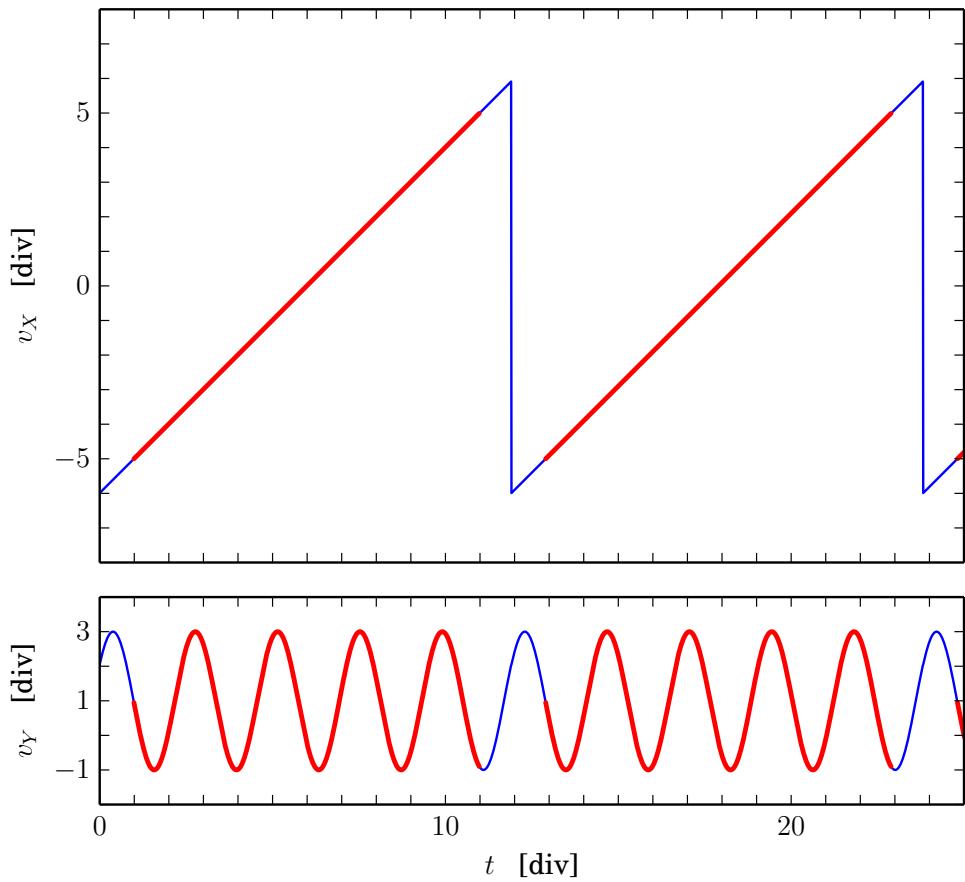
Slika 2.17: Kolo za približno diferenciranje, za izdvajanje ivica signala.



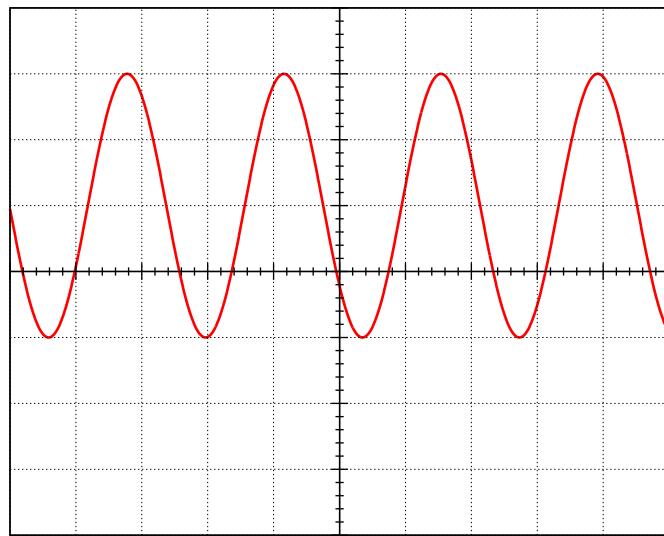
Slika 2.18: Vremenski dijagrami napona na pločama za skretanje elektronskog mlaza, $V_{x0} = -5$ div.



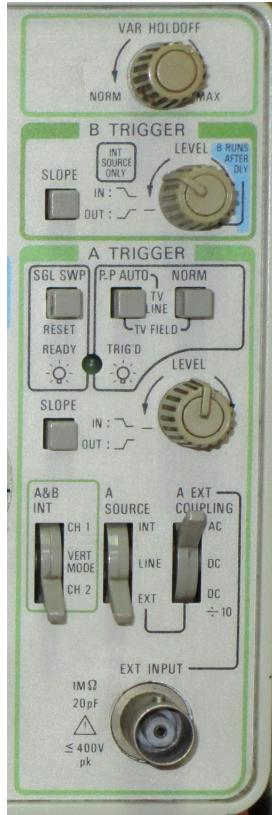
Slika 2.19: Sinhronizovana slika koju osciloskop prikazuje, $V_{x0} = -5$ div.



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 aperiiodičnih 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“.

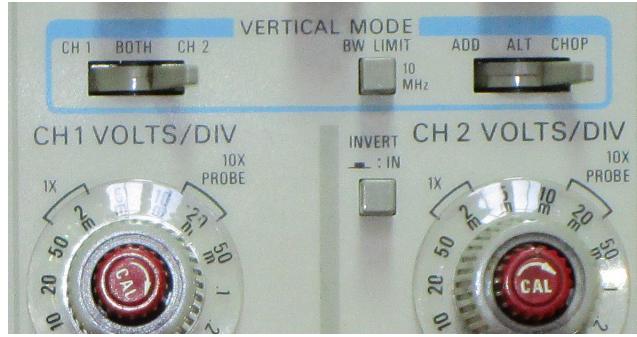
Sa LEVEL (trigger level) je označen potenciometar za kontrolu nivoa signala pri kome se vrši promena stanja na izlazu Šmitovog okidnog kola u sistemu za sinhronizaciju slike. Pri uključenom prekidaču P-P AUTO ona može da se kreće u rasponu od minimalne do maksimalne vrednosti sinhronizacionog signala, 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 sinala 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), pomoći 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 iscrtavani signali sa kanala 1 i kanala 2 tako što se u jednom prelazu elektronskog mlaza preko ekrana osciloskopa iscrtava 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 iscrtava, odnosno kanal koji se trenutno iscrtava 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 zastavljen i kod digitalnih osciloskopa. Preklopnik za izbor kanala koji se prikazuju (CH 1, BOTH, CH 2) je funkcionalno zastavljen 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 luke 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 ulazne 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 osiloskopa, 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

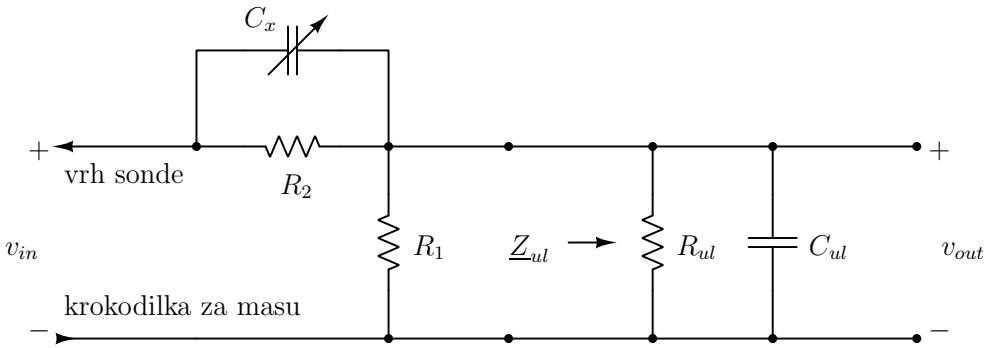
Sonda osciloskopa treba da obezbedi lak pristup signalu koji se posmatra, a često i slabljenje tog signala kako bi se prilagodio dozvoljenom opsegu ulaznih napona osciloskopa. Najčešće se sreću sonde sa slabljenjem od 10 puta, znatno ređe sonde sa slabljenjem od 100 puta, mada postoje i sonde sa većim 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 sondi. 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 sondi

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 trimer 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

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

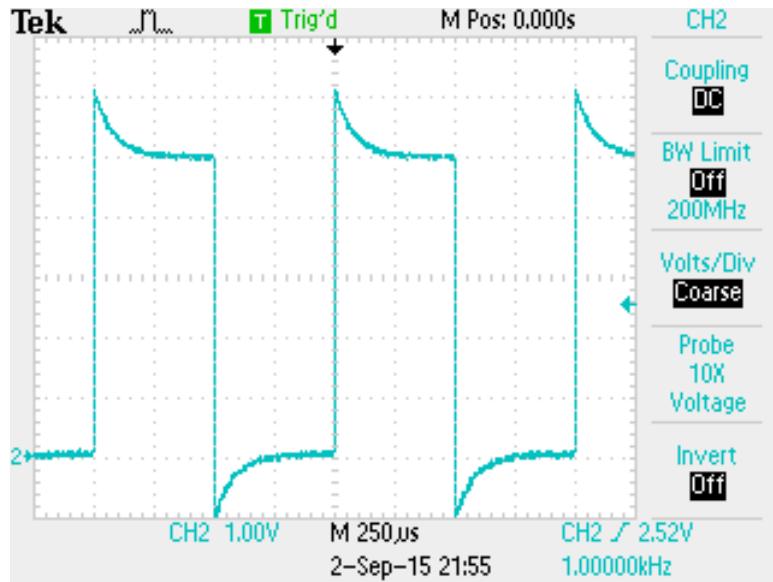
Tipične otpornosti otpornika u razdelniku su takve da je najčešće $R_1 \ll R_{ul}$, pa je prema (3.2) $R_{1ul} \approx R_1$ i funkcija prenosa sistema sonda—osciloskop se svodi na

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

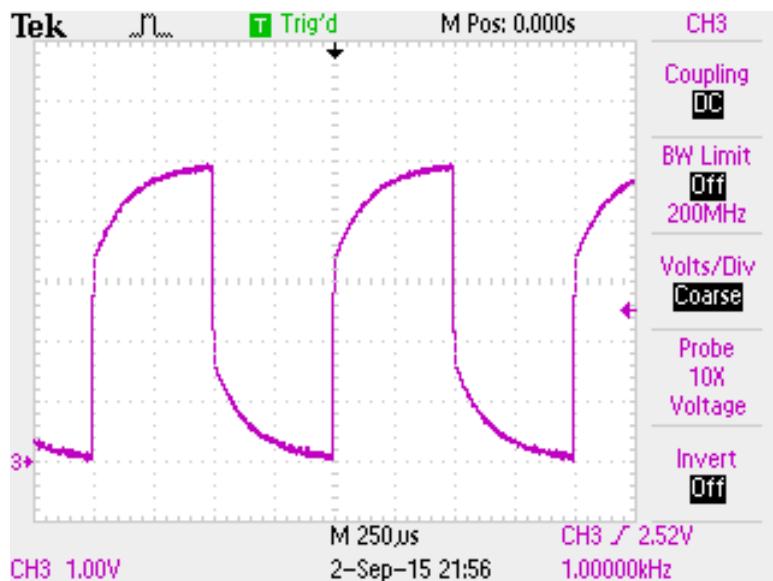
Kako se ulazna impedansa razlikuje od osciloskopa do osciloskopa, potrebno je izvršiti prilagođenje sonde na osciloskop. Prilagođenje se vrši podešavanjem kapacitivnosti promenljivog (trimer) kondenzatora C_x (slika 3.3) koji se nalazi u sondi. Ovo podešavanje se vrši tako što se sonda priključi na izvor 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 sondi 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.

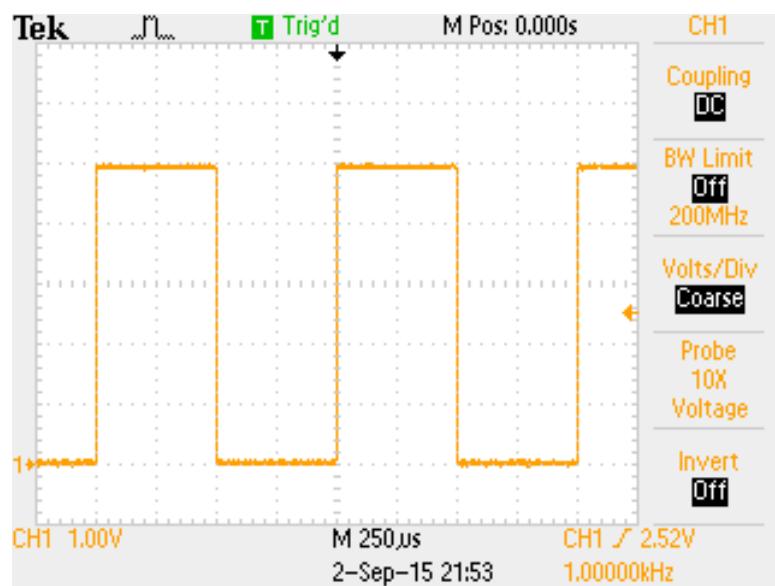
U svim razmatranjima koja slede, smatraćemo da je pre merenja izvršena kompenzacija sonde i nećemo se više na tu temu vraćati. U praksi je čest slučaj da se ne proveri da li je sonda kompenzovana, zbog čega svi rezultati dugotrajnih merenja mogu da budu pogrešni.



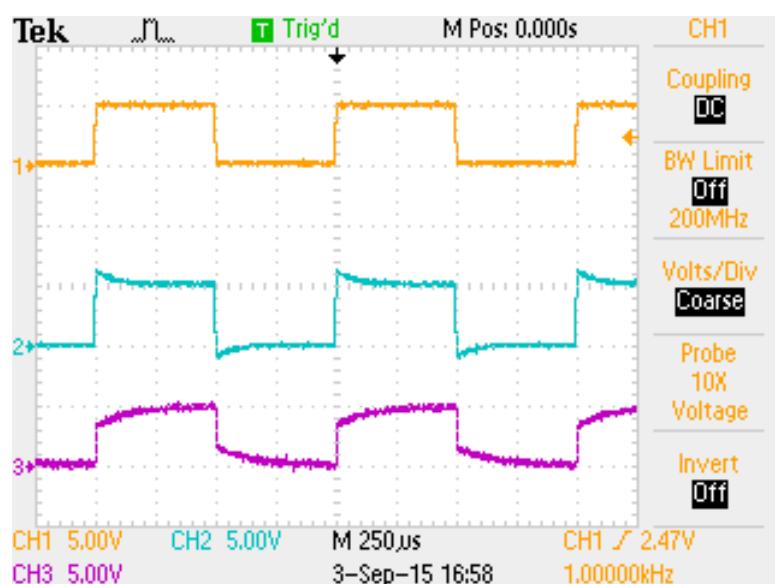
Slika 3.4: Prekompenzovana sonda.



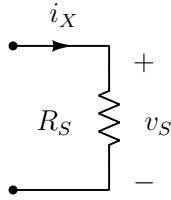
Slika 3.5: Podkompenzovana sonda.



Slika 3.6: Ispravno kompenzovana sonda.



Slika 3.7: Kompenzacija sonde, poređenje.



Slika 3.8: Šant.

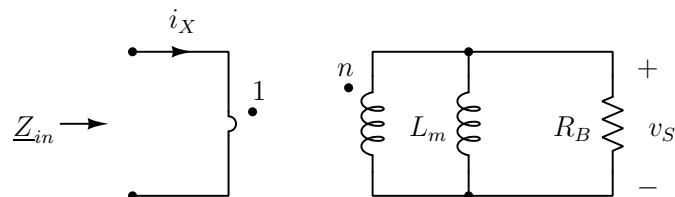
Strujne sonde

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 odgovarajući 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 poglavljju 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 kompletan 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 induktivnost 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 transofmatora je

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

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 induktivnost ($L_m = A_L n^2$), što je dodatna pogodnost. Stoga se za dovoljno veliku frekvenciju signala (upravo će pojed „dovoljno velika“ praviti probleme za merenje jednosmerne struje) može smatrati $\omega L_m \gg R_B$, pa je

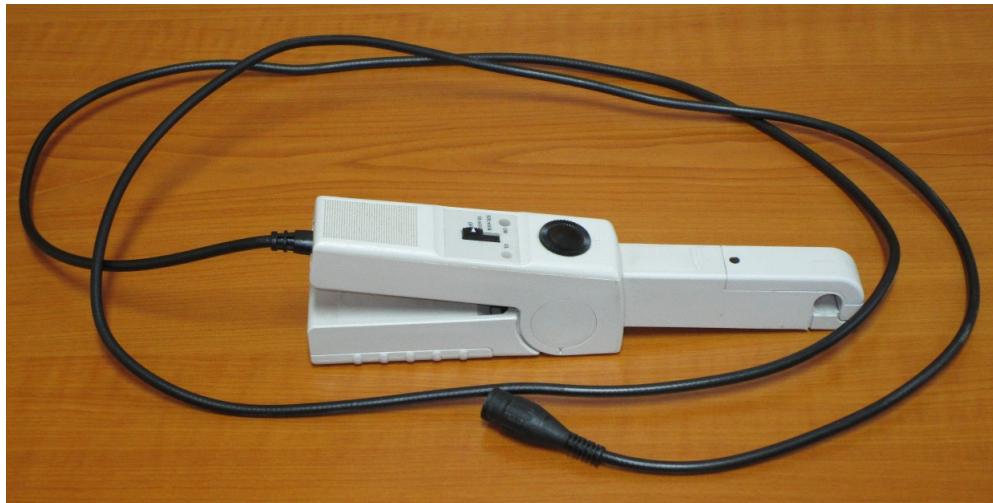
$$Z_{in} \approx \frac{1}{n^2} R_B. \quad (3.9)$$

Analizom kola u koje je umesto šanta umetnut strujni transformator, može se zaključiti da su pri istom naponu na izlazu senzora gubici koje senzor 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 transofmator 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 induktivnost 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 izravnava 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, зависне 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 sonda 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

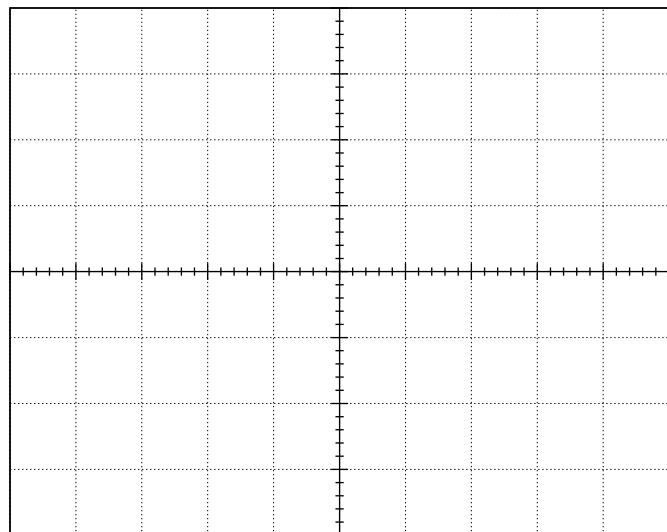
Tipičan ekran osciloskopa, diskutovan u poglavlju koje je obrađivalo katodnu cev i prikazan na slici 2.5 je graduiran kako je prikazano na slici 4.1. Graduacija je ucrtana na ekran osciloskopa sa unutrašnje stane, kako bi se izbegla greška usled paralakse. Merenja pomoću osciloskopa se svode na očitavanja 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.

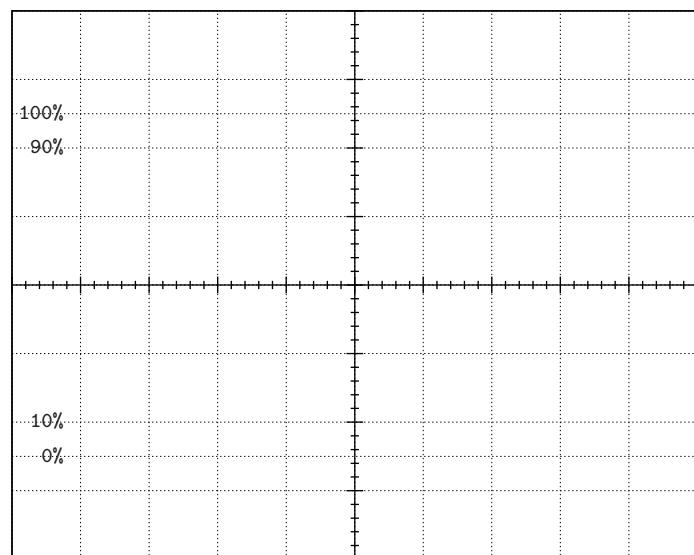
Za sva merenja koja će biti opisana podrazumevaće se da je sonda osciloskopa pravilno kompenzovana i da se potenciometri za kontinualnu promenu podele naponske i vremenske ose nalaze u kalibriranim položajima, izuzev ako se drugačije izričito ne naglasi.

Merenje napona

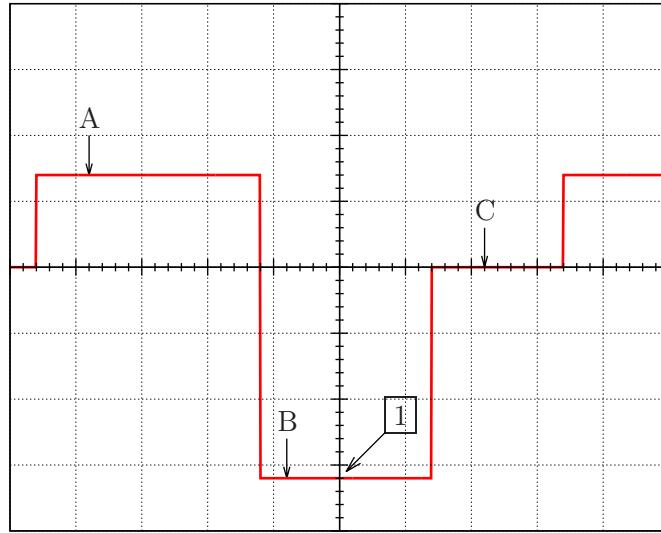
Merenje naponskog nivoa se svodi na merenje rastojanja na ekranu osciloskopa pogodnim korišćenjem njegove graduacije. Da bi se odredili naponski nivoi potrebno je znati gde se nalazi linija nultog potencijala i kolika je podela naponske ose. Podela naponske ose se može odrediti ispravnim očitavanjem 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.

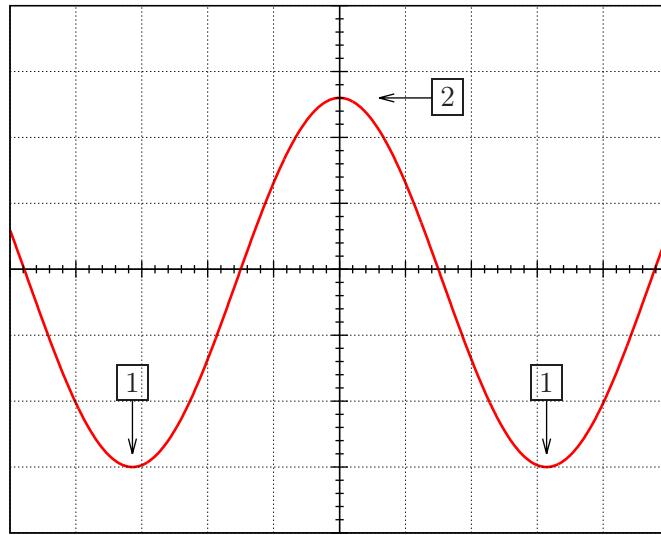
može odrediti prebacivanjem tropoložajnog preklopnika za selekciju tipa prikazivanja signala u položaj GND (slika 2.8). Na ekranu će se pojaviti horizontalna linija koja označava liniju nultog potencijala. Podešavanjem potenciometra $\uparrow\downarrow$ POSITION (slika 2.8) moguće je dovesti liniju nultog 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 potenciometar za horizontalno pomeranje slike (slika 2.12, potenciometar \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 utvrđem 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:

- 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]**.



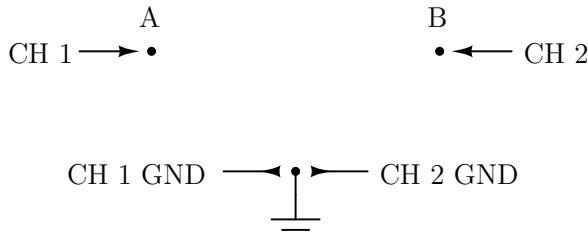
Slika 4.4: Merenje amplitude.

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 doveđe 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, \Downarrow POSITION, doveđe 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 poglavljiju 5, nepoznavanje ove činjenice može da doveđe do grubih grešaka u merenju, kao i do oštećenja uređaja na kome se merenje vrši i/ili merne opreme. Kompletnosti radi, valja napomenuti da postoji i osciloskop 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. Prepostavimo da je potrebno prikazati napon $u_{AB} = v_A - v_B$. Sonda sa kanala 1 je povezana tako da do osciloskopa doveđe potencijal čvora A, v_A , sonda sa kanala 2 je povezana tako da doveđe 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.

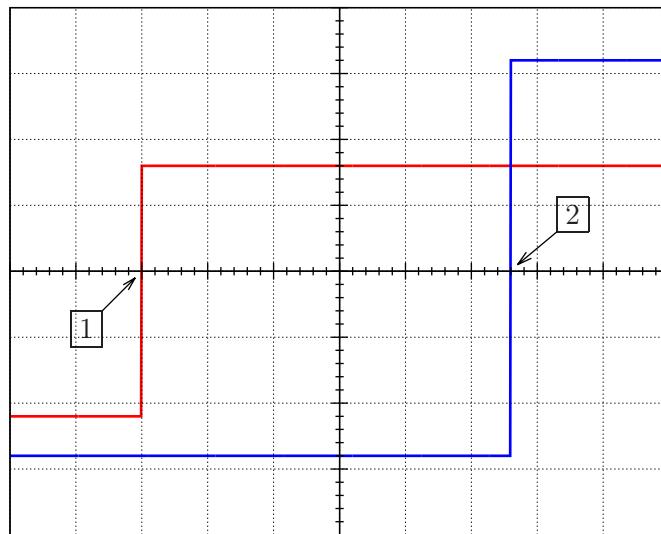
Merenje vremenskih intervala

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 potencijometar za kontinualnu promenu podele vremenske ose u kalibriranom 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.



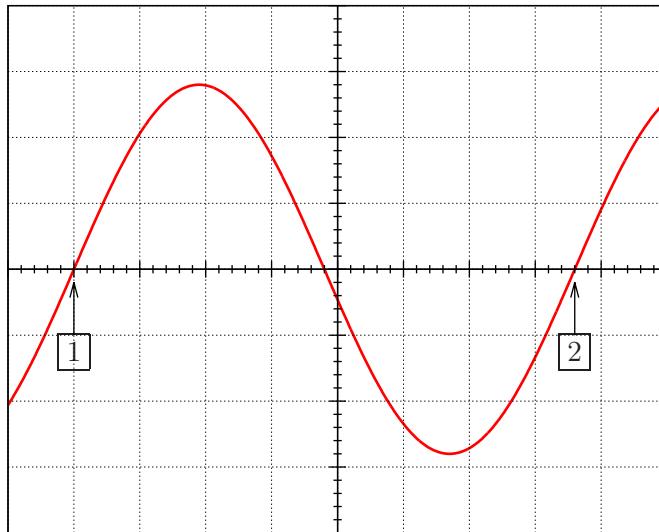
Slika 4.6: Merenje intervala vremena.

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 perioda 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 perioda. 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 .



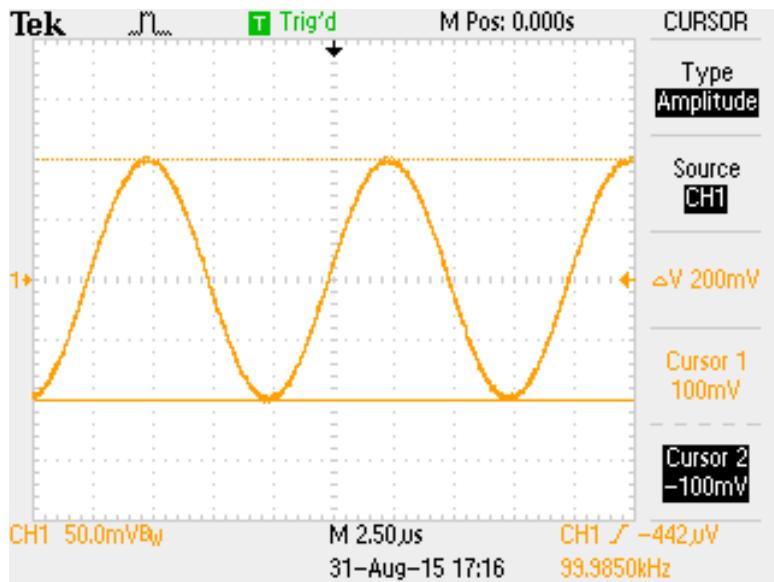
Slika 4.7: Merenje periode.

Korišćenje pokazivača i automatizovanih merenja kod digitalnih osciloskopa

Kao i analogni osciloskopi, i digitalni osciloskopi imaju graduisan ekran, ali se on iscrтava 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 (kursorи, *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, zanovana 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 $V_m = 100 \text{ mV}$.

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 kurzori“. 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.

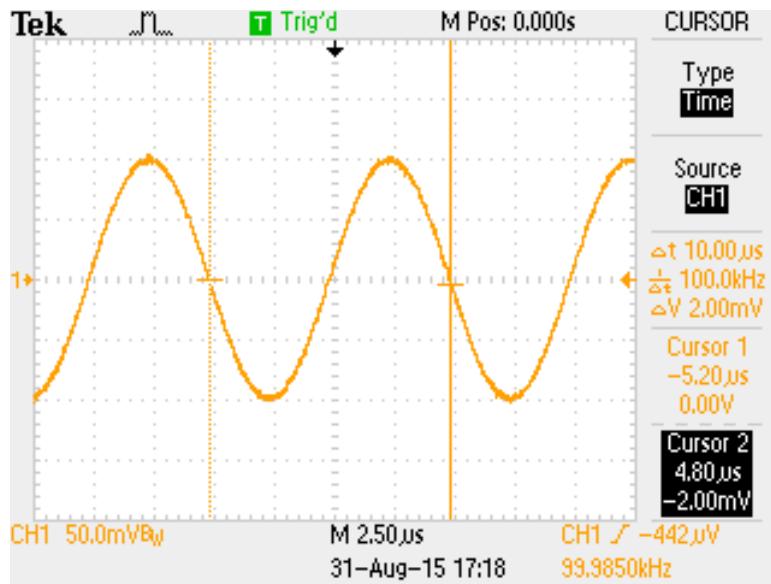
velika, iznosi 2% amplitude, što se može smatrati prihvatljivim.

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 izborom novoga 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.

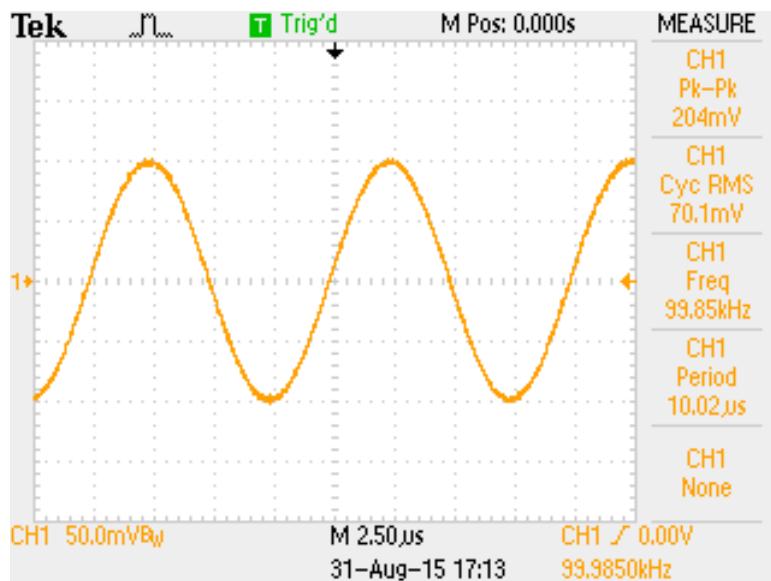
Za sva merenja za koja je potrebno poznavati frekvenciju signala, algoritam zahteva nekoliko perioda signala da bude prikazano na ekranu kako bi periodičnost bila ustanovljena, a perioda i frekvencija određene. Na slici 4.11 je prikazana slika ekrana osciloskopa kada se posmatra isti signal kao u prethodnim 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 zavisan 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 prethodnom primeru.

Merenje trajanja usponske i silazne ivice digitalnih signala

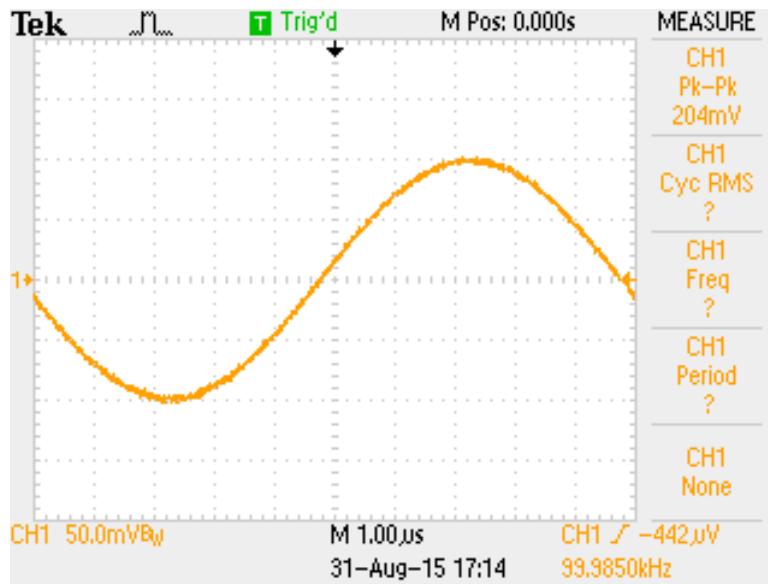
Trajanje usponske ivice digitalnih signala se definiše kao vreme koje protekne dok signal promeni nivo sa 10% na 90% razlike između početne i krajnje vrednosti. Analogno se definiše trajanje silazne ivice.



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



Slika 4.10: Automatizovana merenja na vremenskom dijagramu.

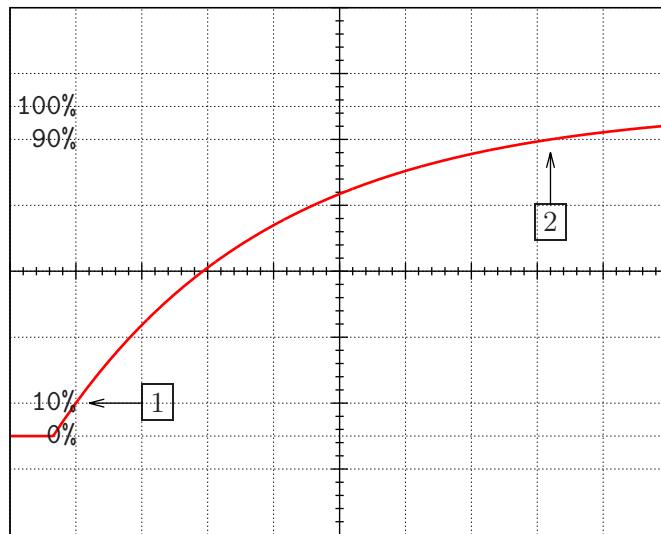


Slika 4.11: Automatizovana merenja na vremenskom dijagramu, problem u određivanju periode.

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 vrši (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 usponsku 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 dijagraama 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 dijagraama 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 $3.6 \mu\text{s}$.

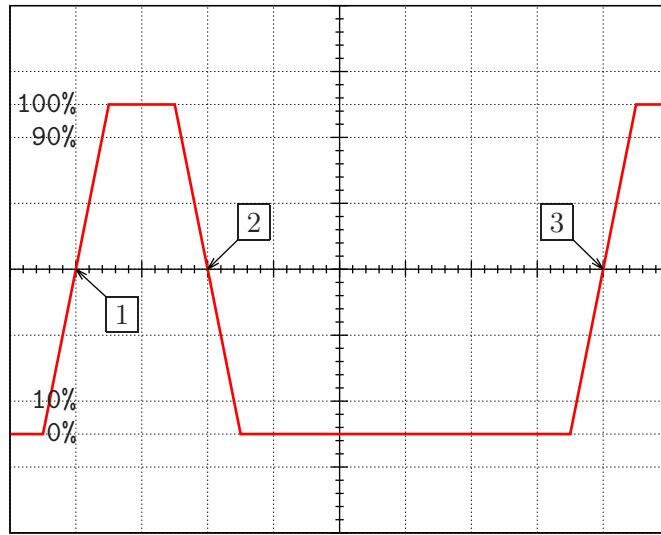


Slika 4.12: Merenje trajanja usponske ivice.

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

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

što u konkretnom primeru sa slike 4.13 iznosi $D = 2$ div/ 8 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 $D = 6$ div/ 8 div = $\frac{3}{4} = 0.75$.

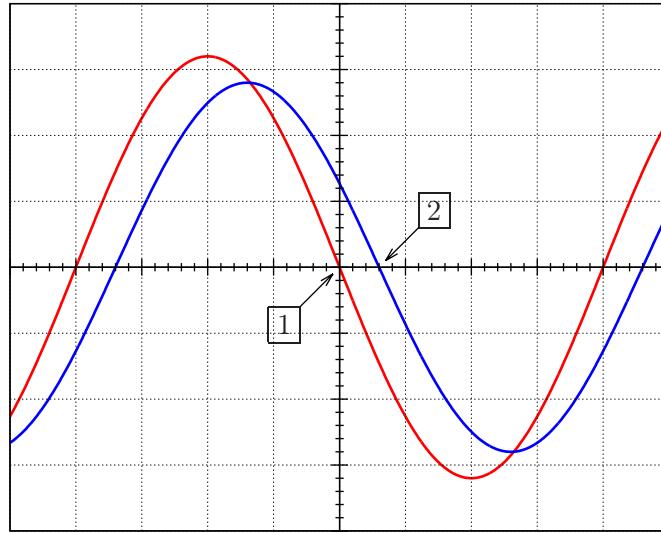
Za D i D' definisane sa (4.1) i (4.2) sa pragom odlučivanja izabranim tako da trenutna vrednost signala određuje logičku vrednost ili 0 ili 1, bez neodređenog stanja, važi

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

Merenje fazne razlike

Za merenje fazne razlike je pre svega potrebno obezbediti jedinstveni izvor synchronizacionog 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 synchronizaciju. 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



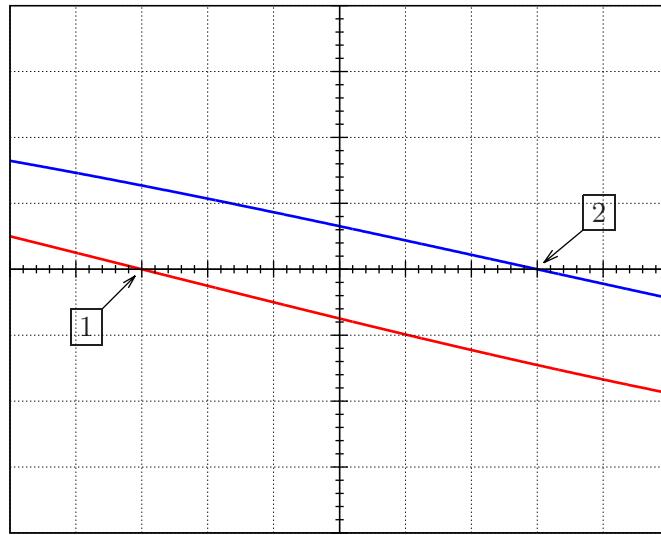
Slika 4.14: Merenje fazne razlike.

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 potenciometra za kontinualnu promenu podele vremenske ose. Pre svega, signale čija se fazna razlika meri potrebno je dovesti na ulaze osciloskopa korišćenjem sondi sa identičnim 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 potenciometar za kontinualnu promenu podele vremenske ose treba podesiti podeлу 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. Ovaj 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

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

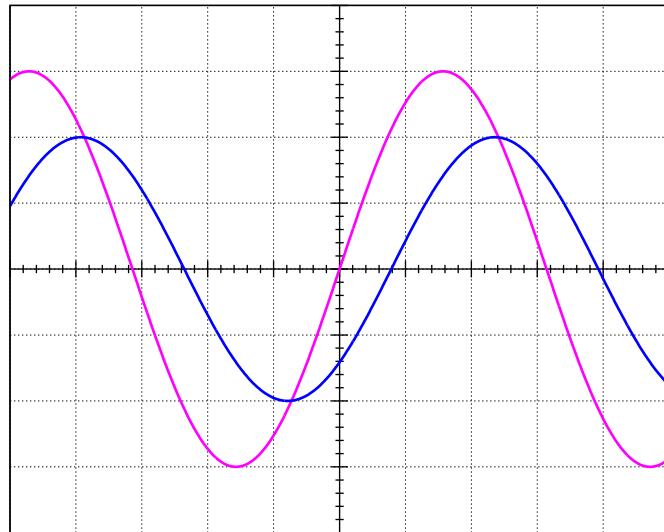
a da je na kanal koji kontroliše ploče za vertikalno skretanje doveden signal oblika

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

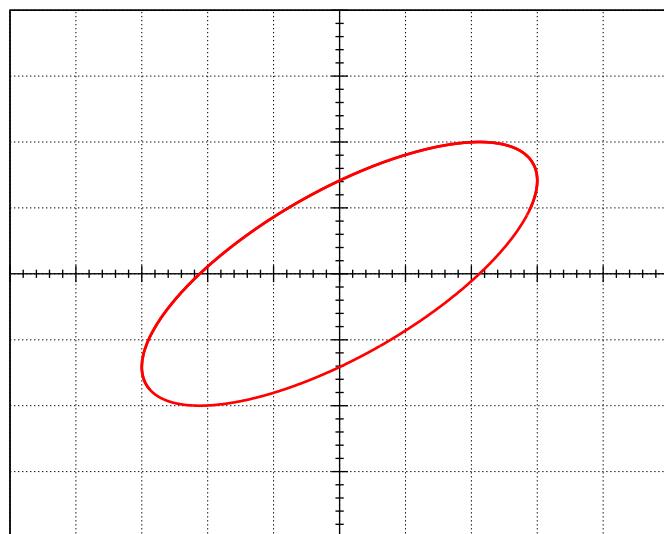
pri čemu je pretpostavljeno da je $X_0 > 0$, $Y_0 > 0$ i $-\pi \leq \varphi \leq \pi$. Cilj je da analizom dobijene slike identifikujemo vrednost φ . Signali određeni sa (4.4) i (4.5) su za $X_0 = 3$ div i $Y_0 = 2$ div i $\varphi = \frac{\pi}{4} = 45^\circ$ u vremenskom domenu prikazani na slici 4.16,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

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

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

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

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

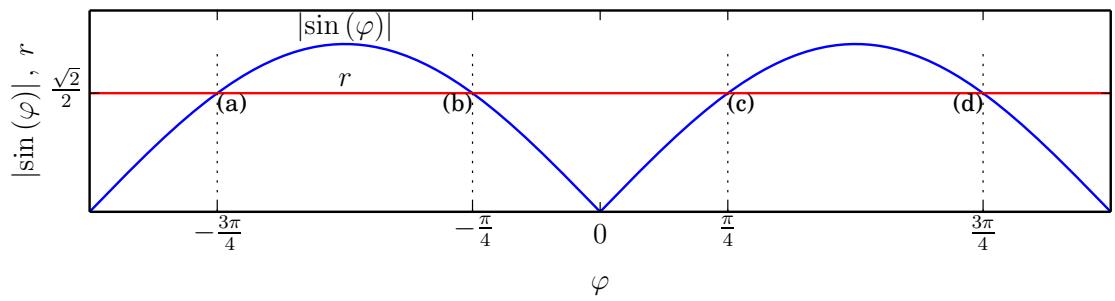
$$r \triangleq |\sin(\varphi)| = \frac{|y|_{x=0}}{Y_0} = \frac{|x|_{y=0}}{X_0}. \quad (4.10)$$

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:

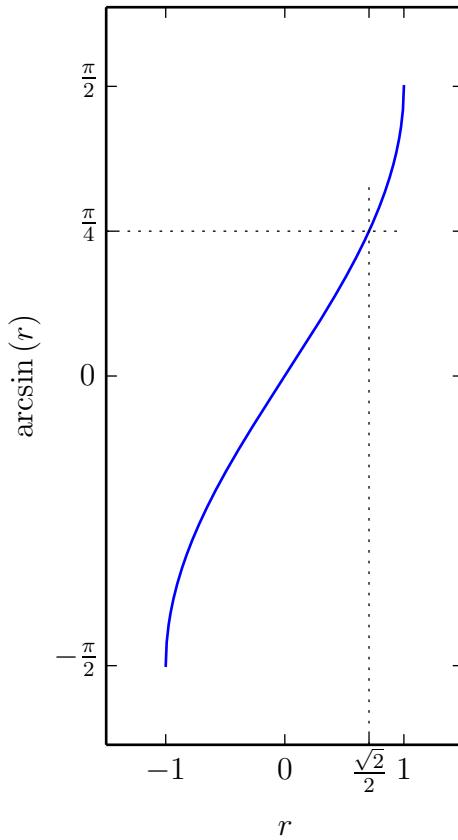
$$\varphi = \begin{cases} -\pi + \arcsin(r) & \text{za } -\pi \leq \varphi \leq -\frac{\pi}{2} \\ -\arcsin(r) & \text{za } -\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq 0 \\ \arcsin(r) & \text{za } 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2} \\ \pi - \arcsin(r) & \text{za } \frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \pi \end{cases} \quad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

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 razmotrone 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 opisnoga u poglavlju 4.11. Drugi način, razmatran u ovom poglavljju, je da se nacrtava 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 absolutne 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 $Y_0 = 4$ div i $X_0 = 5$ div. Sa $\boxed{1}$ je označeno merenje po kome je $y|_{x=0} = 2.8$ div, dok je sa $\boxed{2}$ označeno merenje po kome je $x|_{y=0} = 3.6$ 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 generisanim 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 otici 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 smera 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.

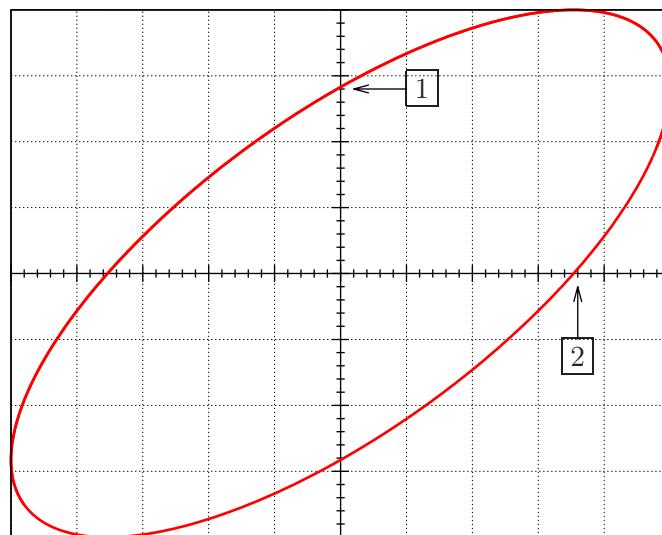
Za određivanje znaka φ , $-\pi \leq \varphi \leq \pi$, neophodno je vraćanje u vremenski domen, samo poznavanje međusobne zavisnosti x i y nije dovoljno da se znak odredi. Informacija o tome koji signal kasni je informacija o smeru u kome teče vreme, a u X–Y ravni ona je sadržana u smeru iscrtavanja 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 absolutnoj 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 $r = |\sin(\varphi)| = \frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0.7071$.

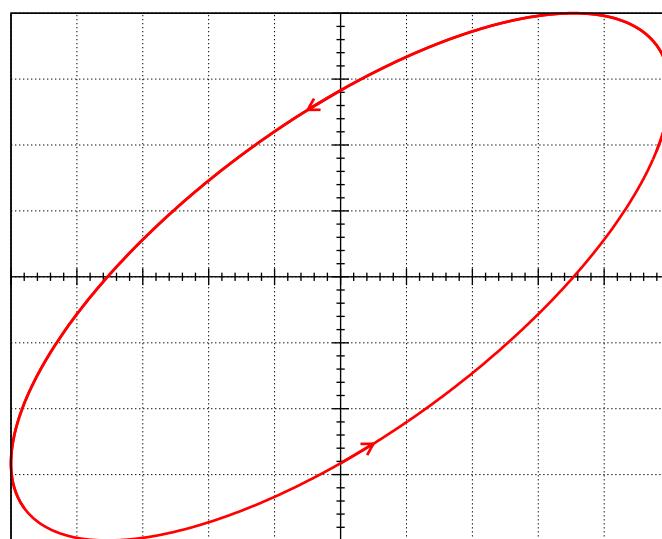
Na osnovu navedenog, algoritam za određivanje fazne razlike primenom Lisažuovih figura se može svesti na sledeća četiri koraka:

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 .

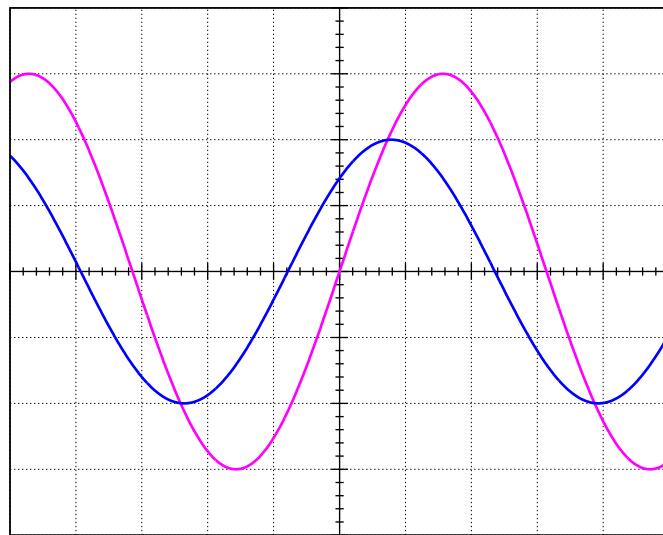
Za $|\sin(\varphi)| = \frac{\sqrt{2}}{2}$ slučaj (c) je prikazan na slici 4.21, slučaj (b) je prikazan na slici 4.23, dok je slučaj (d) prikazan na slici 4.25. U sva tri prikazana slučaja $|\sin(\varphi)|$



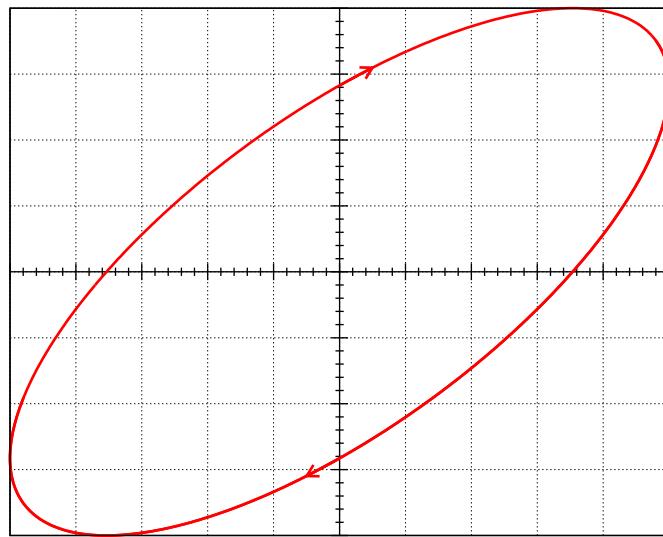
Slika 4.20: Merenje fazne razlike primenom Lisažuovih figura, (x, y) ravan, podešeno pojačanje da se dobije maksimalna veličina Lisažuove figure.



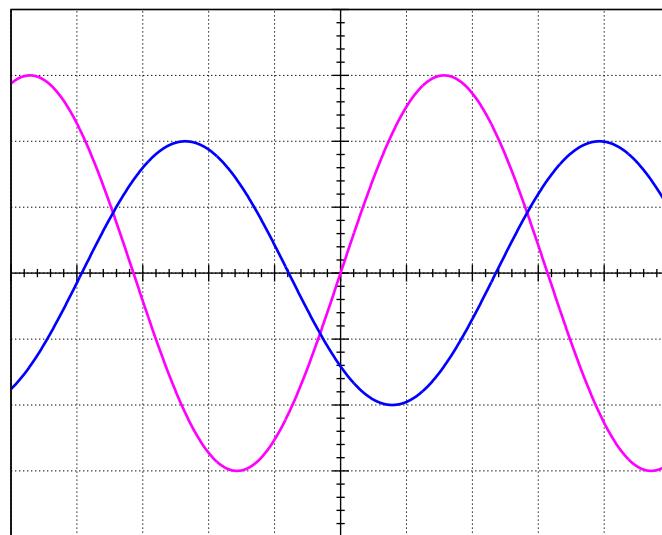
Slika 4.21: Merenje fazne razlike primenom Lisažuovih figura, $\varphi > 0$, slučaj (4.11) pod (c).



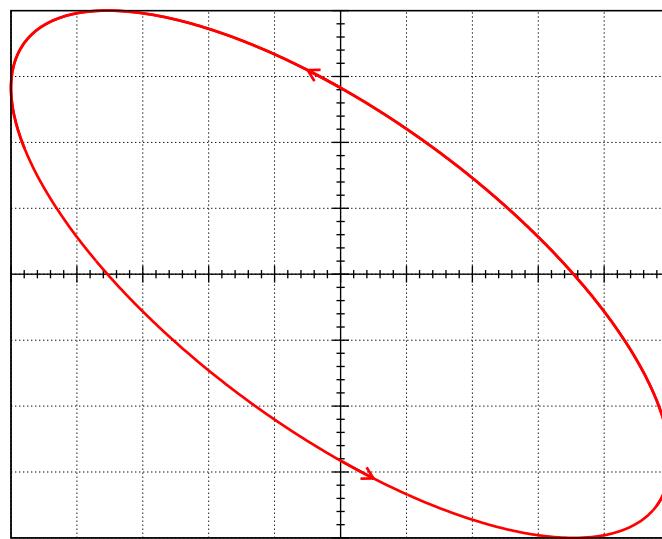
Slika 4.22: Merenje fazne razlike primenom Lisažuovih figura, vremenski domen, $\varphi < 0$.



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 smera 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, Lizažuove 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.

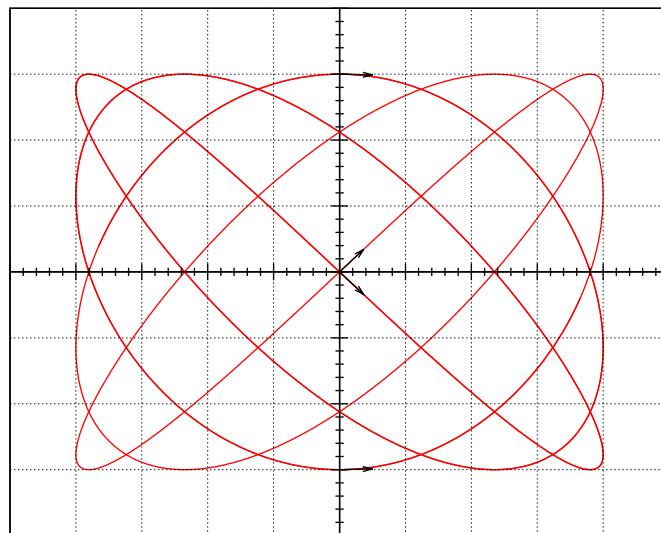
Prepostavimo da su na osciloskop dovedena dva prostoperiodična signala koji mogu imati različite frekvencije, a tim i periode, gde je T_x perioda signala koji kontroliše skretanje po x osi, a T_y perioda signala koji kontroliše skretanje po y osi. Ukoliko postoje prirodni brojevi m i n ($m, n \in \mathbb{N}$)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

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

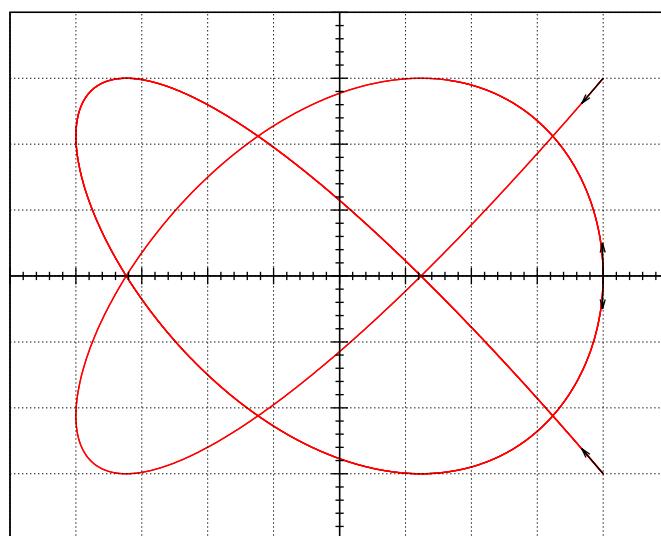
nakon intervala vremena T će se oba signala (u smislu „i jedan i drugi“) ponavljati, $x(t+T) = x(t)$ i $y(t+T) = y(t)$ pa će T biti njihov zajednički period. Za takve signale kažemo da imaju samerljive periode. Takođe, i frekvencije su im samerljive, pošto je u tom slučaju

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

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, $x = 4 \text{ div } \sin(4\omega t)$, $y = 3 \text{ div } \sin(5\omega t)$.



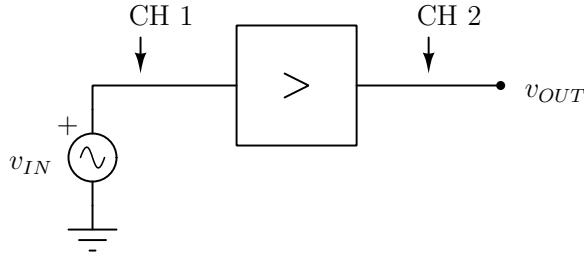
Slika 4.27: Degenerisana Lisažuova figura, $x = 4 \text{ div } \cos(4\omega t)$, $y = 3 \text{ div } \cos(5\omega t)$.

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 identificuje 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 identificuju 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 fekvencijom 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 ovakovom 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. Takkim 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.

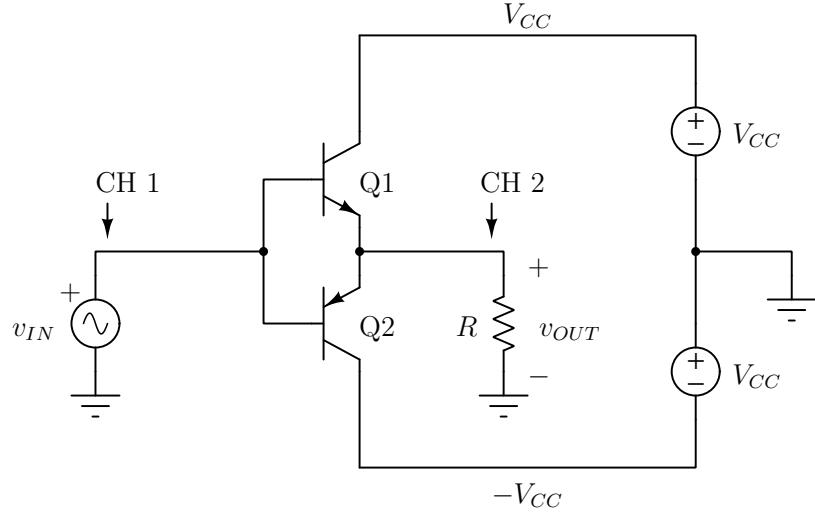
kao i za figuru sa slike 4.26, $T_x : T_y = 4 : 5$.

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 sondi osciloskopa kojim se snimanje prenosne karakteristike neposredno vrši. 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 sondi 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. Pretpostavćemo 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

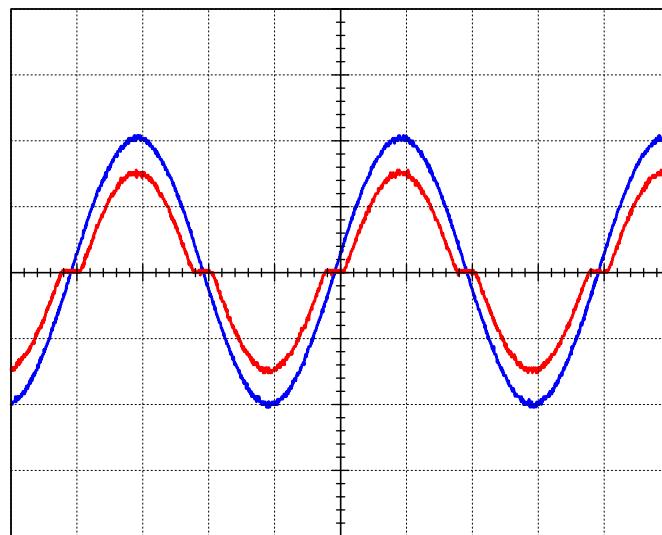
$$H = \frac{n i_L}{l_e} \quad (4.16)$$

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

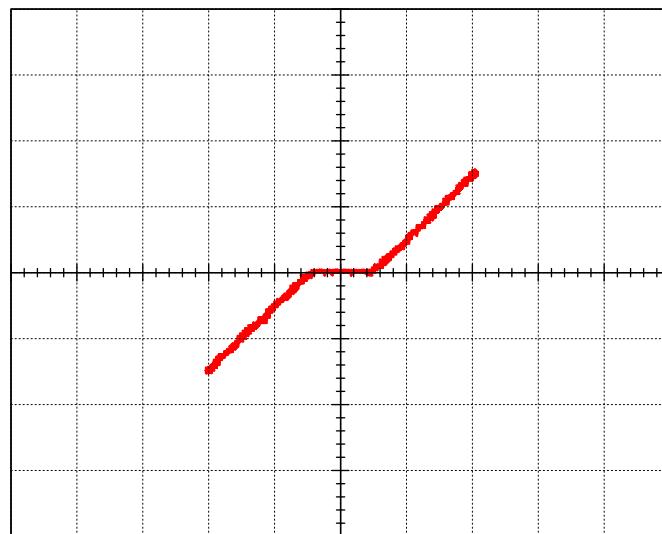
Kako bi se izmerila magnetska indukcija, potrebno je koristiti Faradejev zakon elektromagnetske indukcije prema kome je indukovani napon na krajevima namotaja

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

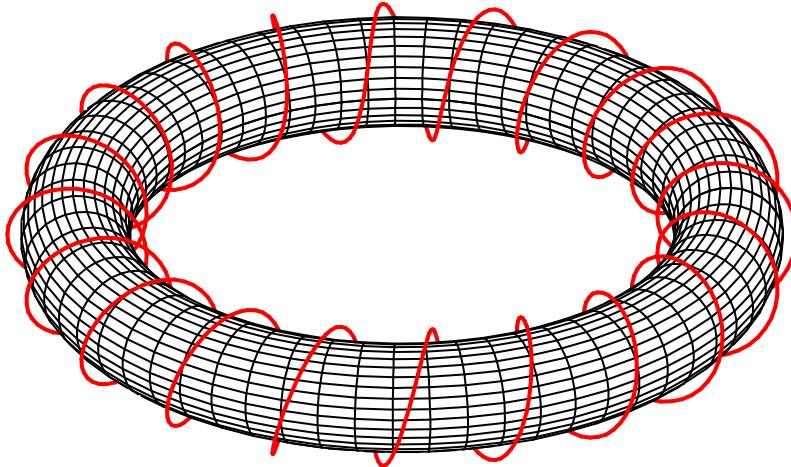
gde je $\Phi = A B$ magnetski fluks u torusnom jezgru, $\lambda = n \Phi$ je fluks obuhvaćen namotajem, a v_L je napon indukovani na krajevima namotaja. Znak – iz Faradejevog zakona je nestao usled promene referentnog smera merenja indukovanih napona kako bi na kalemu bili usaglašeni referentni smerovi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



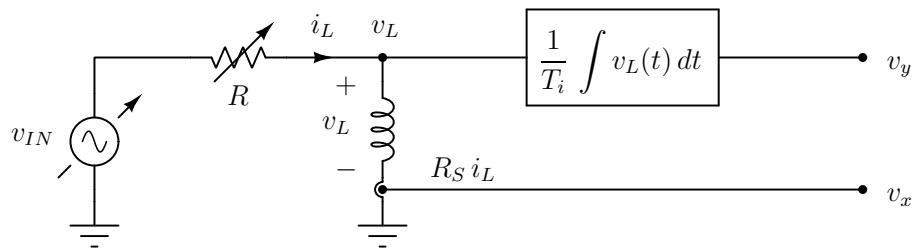
Slika 4.30: Ulazni (plava linija) i izlazni (crvena linija) napon pojačavača snage u klasi B. Podela naponskih osa 1 V/div. Podela vremenske ose 2.5 ms/div.



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.



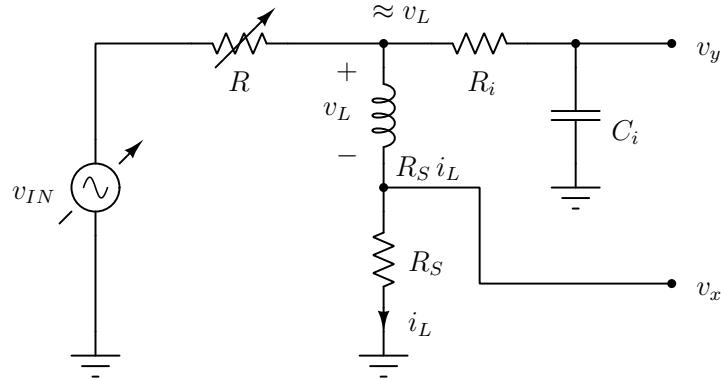
Slika 4.33: Principska šema sistema za snimanje krivih mагнећења.

uobičajenom u teoriji električnih kola. Odavde je

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

čime se merenje magnetske indukcije svodi na merenje i integraljenje napona indukovanih 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 ($\overline{B(t)} = 0$) 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 komponenata. 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

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

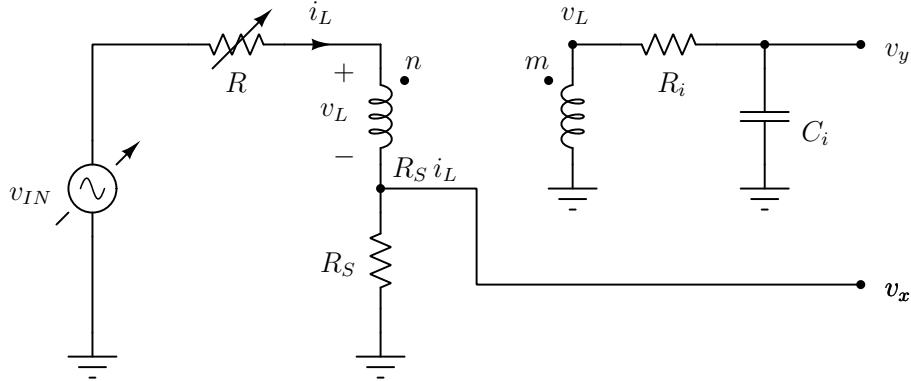
Funkcija prenosa $H_{ri}(j\omega)$ dobro aproksimira $H_{ii}(j\omega)$ ako je

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

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

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

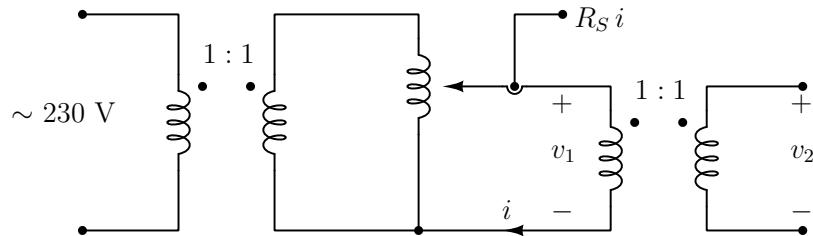
pa će na ekranu biti prikazana željena kriva magnećenja kada se eliminiše vreme posmatranjem dijagrama sa podelom vremenske ose postavljenom na X—Y.

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 nezanemariv 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

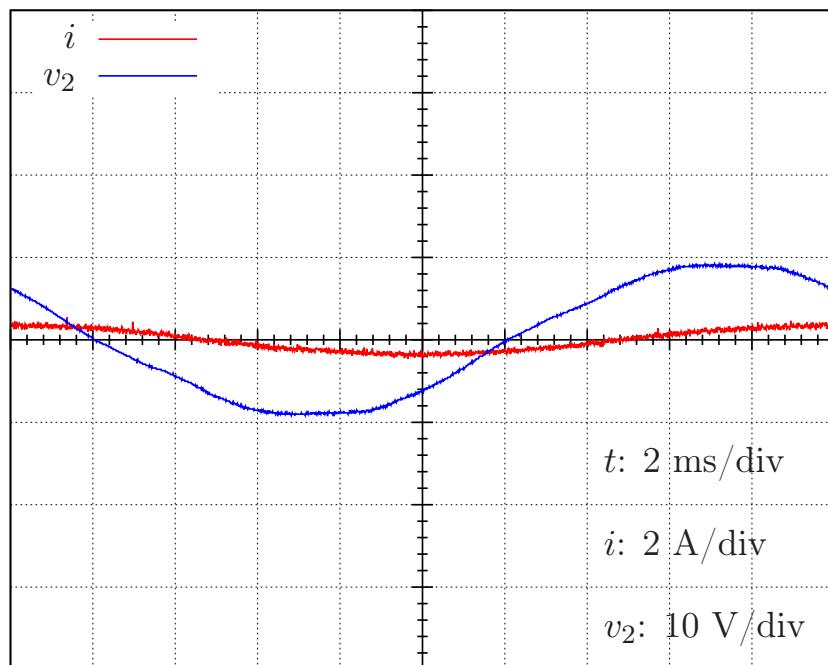
$$B(t) = \frac{R_i C_i}{m A} v_y(t). \quad (4.27)$$

Primer snimanja krivih magnećenja primenom digitalnog osciloskopa

U cilju ilustrovanja opisanog metoda za snimanje krivih magnećenja feromagnetskih 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



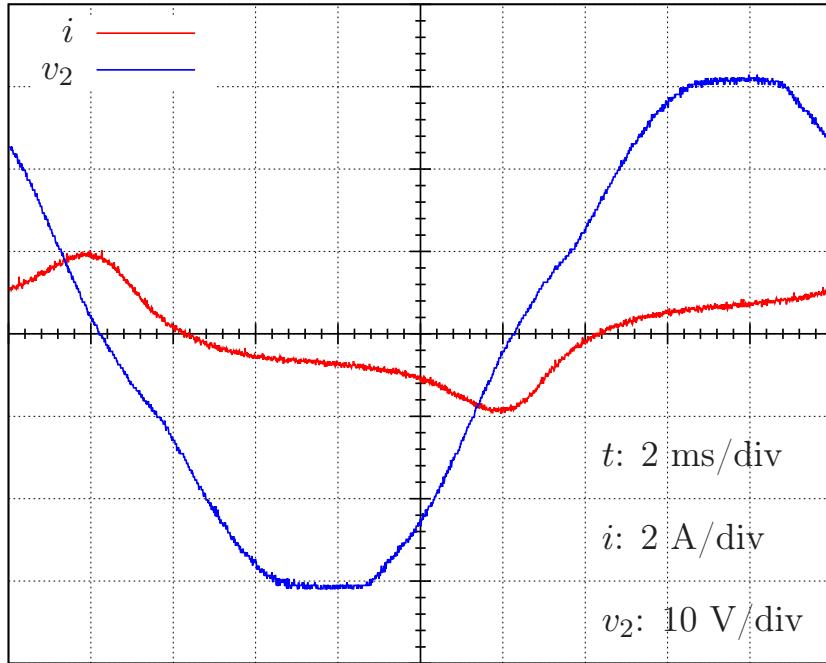
Slika 4.36: Sistem za snimanje krivih magnećenja jezgra mrežnog transformatora.



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.

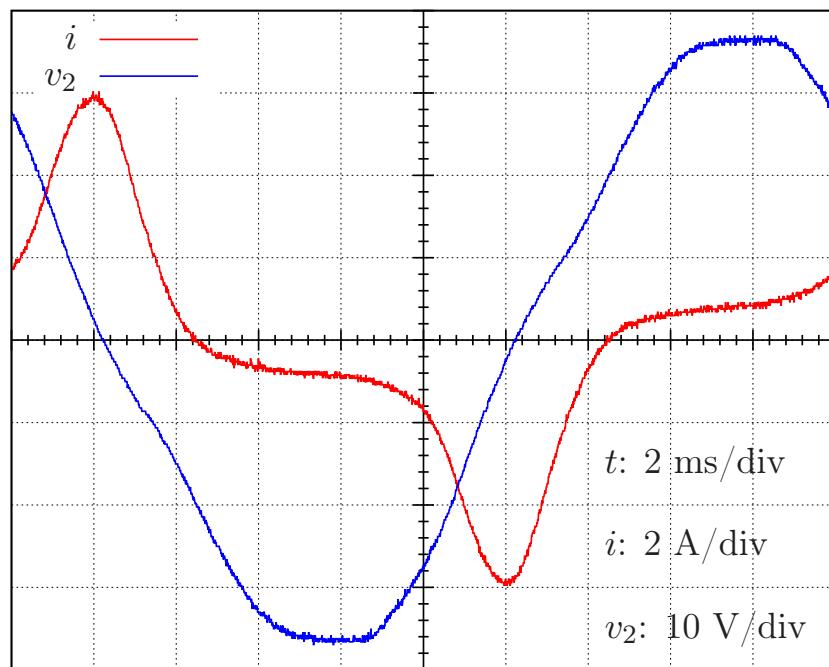
Snimanje krivih magnećenja je izvršeno za nekoliko vrednosti amplitude struje magnetizacionog namotaja, od kojih su ovde prikazani slučajevi sa amplitudom struje magnetizacije od 0.1 A, 0.5 A i 1.5 A. Prvo su snimljeni dijagrami struje i magnetizacionog namotaja i napona v_2 mernog namotaja i oni su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



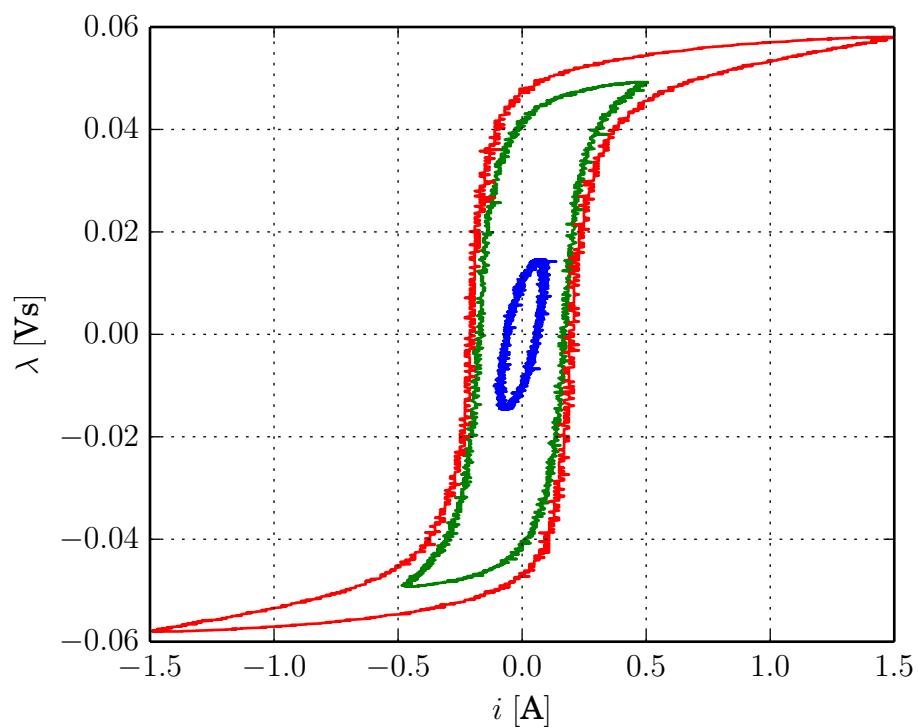
Slika 4.38: Struja magnetizacionog i napon mernog namotaja; amplituda struje 0.5 A .

Odabiranje je primenom digitalnog osciloskopa vršeno sa vremenskim korakom $\Delta t = 10 \mu\text{s}$, 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 prepostavkom 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 linearном režimu, zelena pokazuje jasne znake nelinearnosti i zasićenja, dok crvena odgovara radu u dubokom zasićenju.

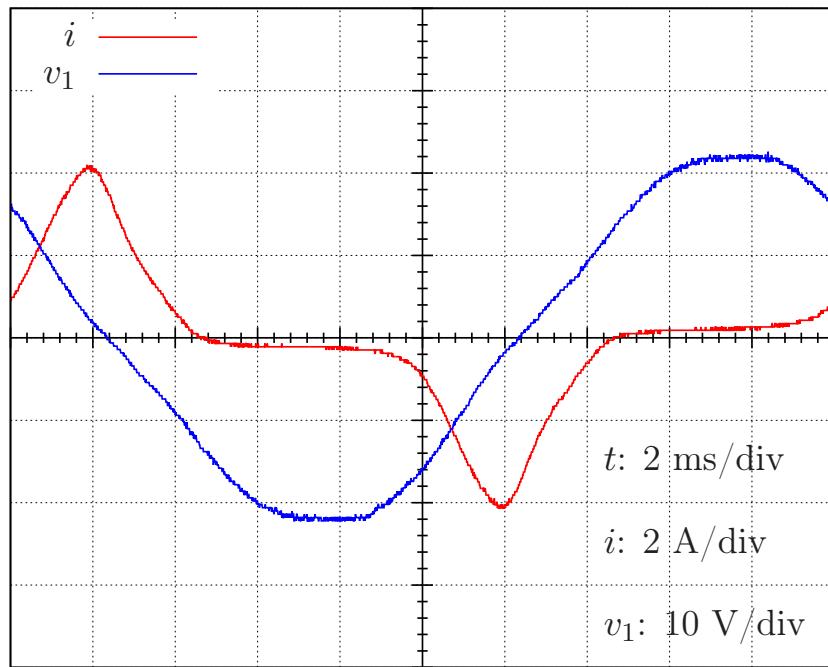
U cilju ilustrovanja razlike između sistema za snimanje magnetizacionih krivih koji koristi jedan namotaj, prikazanog na slici 4.34, i sistema sa dva namotaja, prikazanog na slici 4.35, u kolu sa slike 4.36 su pri istim uslovima snimljeni naponi pobudnog namotaja v_1 i mernog namotaja v_2 , radi poređenja. 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.

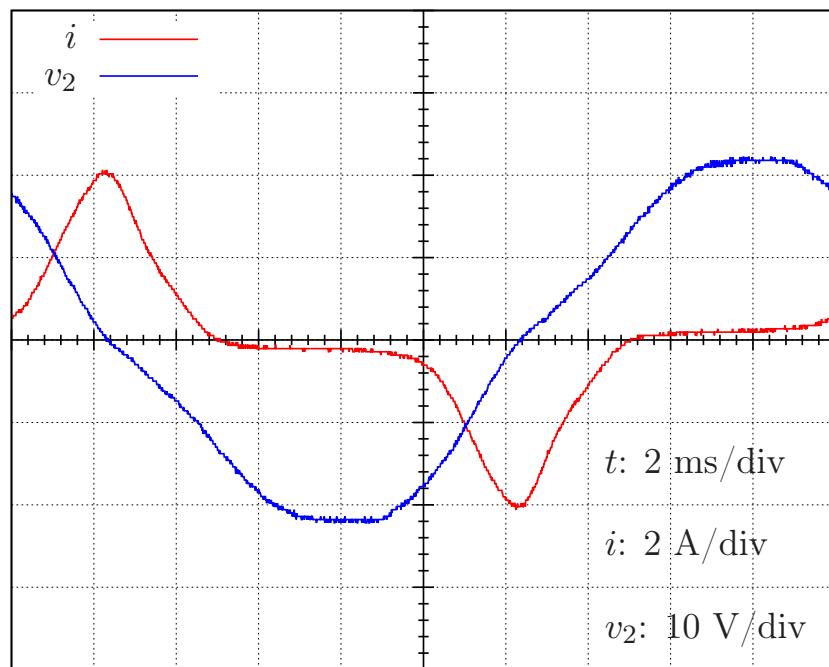


Slika 4.40: Krive magnećenja jezgra.

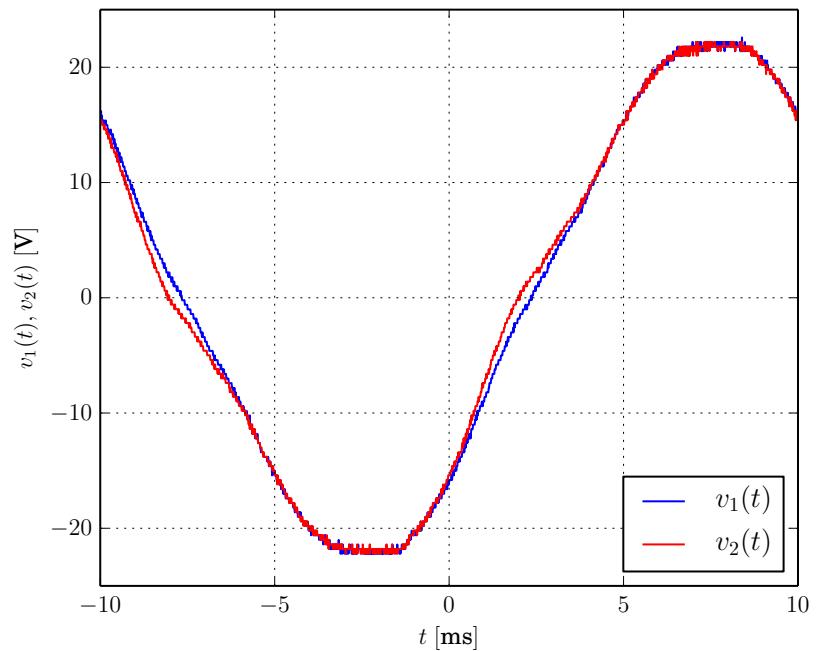


Slika 4.41: Struja i napon magnetizacionog namotaja; amplituda struje 4 A.

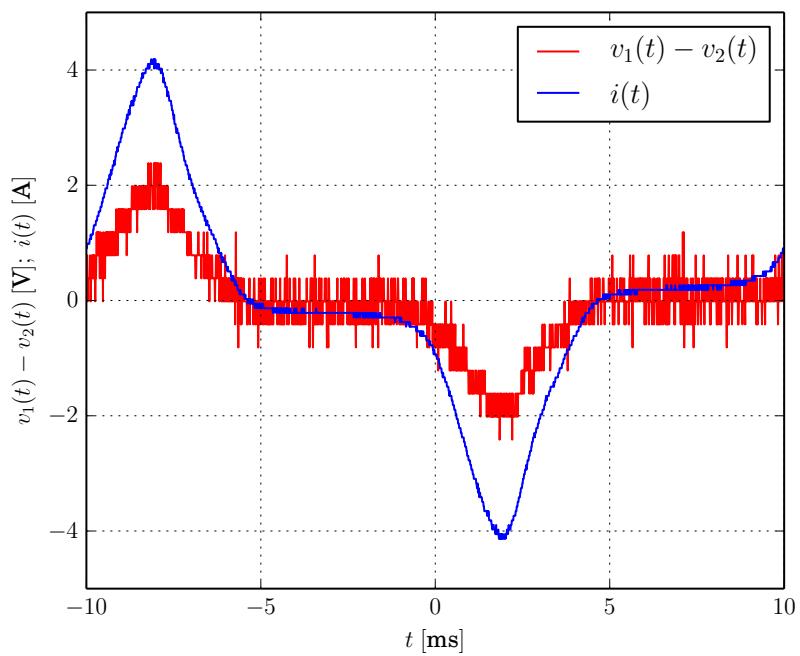
pobudnog i mernog namotaja, koja po pretpostavci odgovara omskom padu napona na mernom namotaju, prikazana na slici 4.44 zajedno sa vremenskim dijagramom struje pobudnog namotaja. Iako su u razlici napona $v_1 - v_2$ vidni efekti kvantizacije, uočava se jasna korelacija između $v_1 - v_2$ i struje magnetizacionog 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 $v_1 - v_2$.



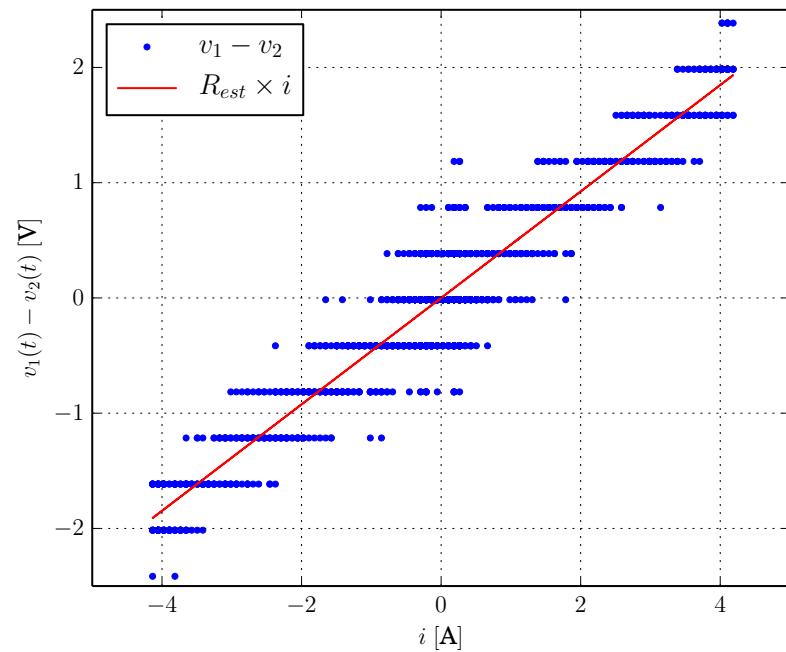
Slika 4.42: Struja magnetizacionog i napon mernog namotaja; amplituda struje 4 A.



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 sondi, uređaja na kojima je merenje vršeno, kao i samih osciloskopa. Ovakva neslavna reputacija je dovela do posvećivanja posebnog poglavља 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.

Prepostavimo 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 sondi 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 prepostavkom 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. Pokazivanje 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.

Priklučivanje sonde na način prikazan na slici 5.1.C će dovesti do promene raspodele napona i struja u kolu pošto uslovjava $v_3 = 0$. 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. Posto 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 $P_3 = 0$.

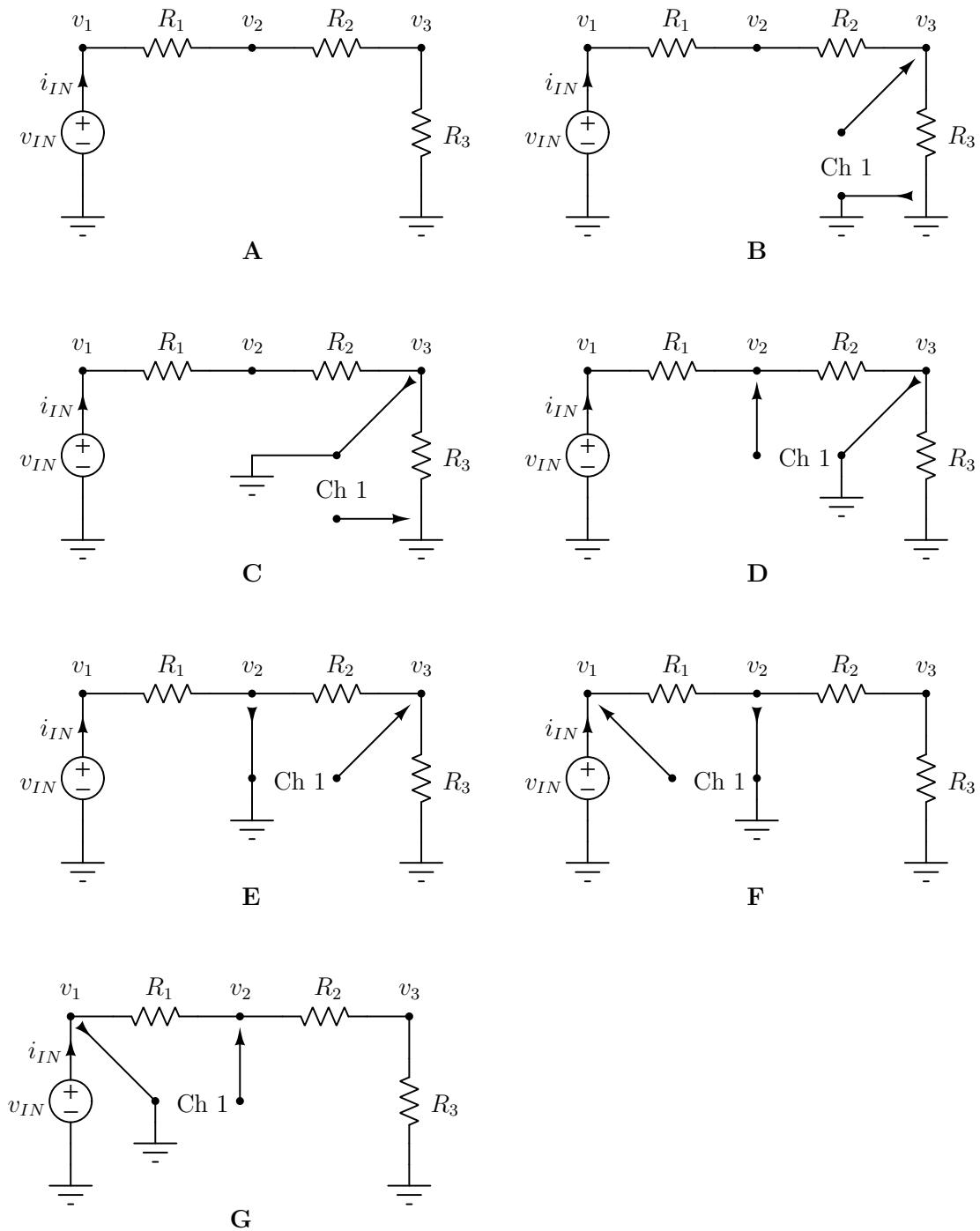
Priklučivanje sonde na način prikazan na slici 5.1.D će opet dovesti do opisane promene raspodele napona, struja i disipacija u kolu, pošto je masa sonde osciloskopa priključena na isto mesto, pa je isti čvor time doveden na referentni potencijal, na potencijal uzemljenja. Poslednji otpornik u nizu će 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 osiloskopu 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 osiloskopu 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 osiloskopu 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 dugو 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 izmerenog 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 izmerenog 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>

СИР - 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

Sistemski zahtevи: Nisu navedeni. - Nasl. sa naslovne strane dokumenta. - Tiraž 50. - Sadrži bibliografiju.

ISBN 978-86-7225-060-2

a) Осцилоскопи - Приручници
COBISS.SR-ID 225253388
