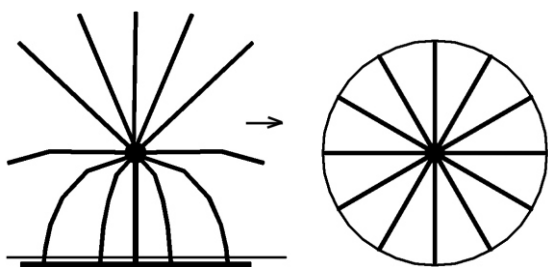


ISKANJE SKRITIH ŽIC IN VODOVODOV

Francoski kralj Ludvik VIII se je odločil, pa prenove versajsko palačo, ampak prvotni gradbeni načrti so se izgubili. Prenavljalci ne vedo, kje se skrivajo električne in vodovodne napeljave. Tudi iskalni instrumenti, ki bi pomagali rešiti vprašanje, še niso izumljeni. Ampak mi, zbrani tukaj, smo skupina pametnih fizikov. Uporabimo svoje fizikalno znanje in pomagajmo ubogemu kralju, da bo lahko živel dostojno v prenovljeni palači.

Prvoposkus. V električnih žicah pod ometom je napetost 220V. Sreča, da nismo v Ameriki. Tam je le 117 V in bi jo težje zaznali. Skušajmo oceniti, ali je vredno poskusiti.

Kaj bi lahko ugotovili s kovinsko ploščico naslonjeno na zid, ki skriva električno napeljavo? Naša ploščica ima proti žici, skriti v zidu, kapaciteto, in prek te kapacitete bomo skušali zaznati napetost na žici znotraj zidu. Poskusimo oceniti, kolikšna je kapaciteta C med ploščico in žico! Ploščica naj bo dolga 10 cm in široka 5



Sl.1. Zidna ploščica bo morda polovila polovico silni. Kapaciteto ocenimo kot polovično kapaciteto koaksialnega kabla

cm. Naš model bo koaksialni kabel s srednjo žico debeline 1 mm, oklep pa naj ima radij 2 cm. Toliko naj bo tudi naša napeljava globko v zidu. Dejanske razmere in razmere pri modelu kaže sl.1

Kapaciteto koaksialnega kabla hitro najdemo prek interneta, če se ne spomnimo enačbe:

$$C = 2 \pi \epsilon_0 l \ln\left(\frac{R}{r_0}\right),$$

kjer je R radij oklopa, r_0 radij srednje žice, l pa dolžina. Pri ploščici dolžine 10 cm je ocenjena kapaciteta okoli 1 pF.

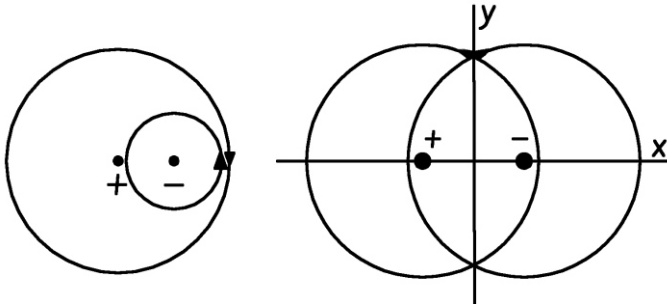
Z osciloskopom ($R_{vh} = 1 \text{ M} \Omega$)

lahko pričakujemo napetosti okoli 100 mV. Velja preveriti s poskusom!

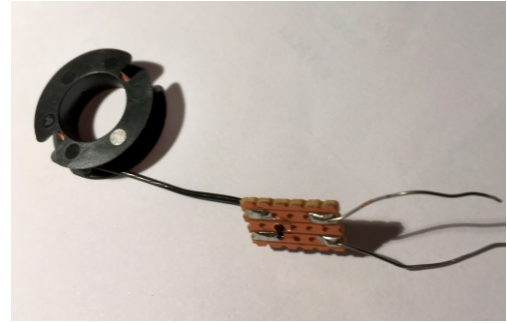
Pa še pomislek. Električna napeljava je obdana z malto. Ta vsaj nekoliko električno prevaja. Bo zato delovala kot oklop in odpeljala del električnih silnic proti zemlji? Z računanjem bi izgubili preveč časa. Predlagam poskus.

Drugi poskus. Če prižgemo luč ali če v zidno vtičnico priključimo električno pečico, steče po žicah tok. Tok ustvarja vsenaokoli magnetno polje. Ker je to polje izmenično, se lahko v tuljavici blizu vodnika inducira napetost, ki jo pokaže osciloskop. Bi lahko tako iskali žice s tokovi skrite pod ometom?

Žal mora tok, ki teče v pečico, tudi nazaj. Vrača se po žici, ki leži poleg žice, ki vodi tok tja. Tok tja ustvarja magnetno polje, tok nazaj pa enako polje, vendar so poljski vektorji B obrnjeni ravno nasproti vektorjem, ki ga povzročata tok tja. Če bi bili obe žici na istem mestu, bi se polji tako povsem izničili. Ker sta nekoliko narazen, nekaj polja le ostane. Nad obema žicama pa se polji skoraj izničita. Razmere kaže slika 2. Spet ocenjujmo možnosti, da bi s pomočjo napetosti iz tuljavico blizu zidu zvedeli kaj o toku.



Sl.2, levo. Mesto, kjer sta puščici, je precej bližje negativnemu vodniku kot pozitivnemu. Polji se ne izničita. Desno: ko sledimo polju v smeri y, se polji obeh vodnikov skoro izničita



Sl.3. Premer tuljavice s 100 ovoji je približno 20 mm

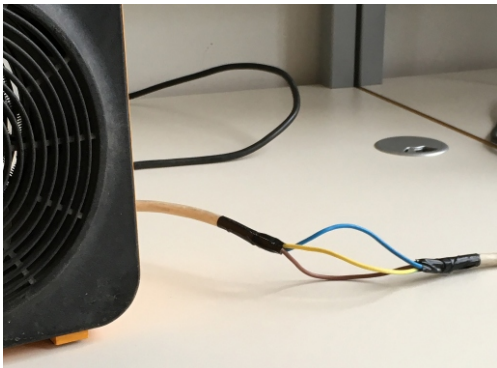
Enačba za magnetno polje našega ravnega vodnika, po katerem teče tok I , je znana:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2r} \sin \alpha$$

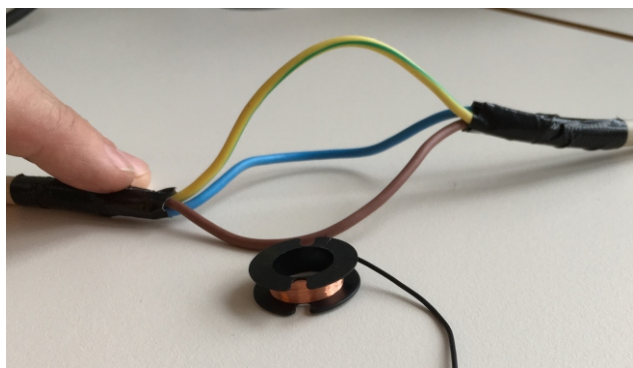
Ocenimo, kolikšno napetost lahko pričakujemo v tuljavici s 100 ovoji (sl.3). Za inducirano napetost vemo

$$U_i = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

Poskus s tuljavico in osciloskopom je nama z Dušanom uspel celo na poti



Sl.4. Za uspešno meritev potrebujemo tok nekaj amperov. Zagotavlja ga pečica. Kabel smo razpletli, da lahko merimo polje osamljene žice



Sl.5. Tako lovimo magnetno polje zelene žice. Modra žica je precej oddaljena, zato njeno polje ne nagaja

okrog kabla, tako da sva izvedela celo lego obeh vodnikov v kablu.. Res pa je, da sva primaknila tuljavico kablu tako blizu kot je bilo le mogoče (sl.4 in 5).

V zidnih napeljavah pa smo z indukcijsko tuljavico preveč oddaljeni od obeh žic. Iskanje žic prek magnetnega polja bo tako neuspešno

Nova ideja. Žice v zidu so bakrene, čeprav smo pred približno 50 leti pri nas uporabljali aluminij zaradi pomanjkanja bakra. Kemiki so navdušeni nad tako imenovano rentgensko fluorescenčno analizo (XRF). Z rentgenom posvetimo na vzorec z neznano sestavo. Recimo, da iščemo baker. Fotoni rentgenskega sevanja lahko izbijajo iz lupine K bakrovih atomov elektrone. V nastalo luknjo pade eden od

elektronov z višjih lupin. Energija, ki se sprosti pri padcu, je foton z značilno energijo, ki je pri bakru nekoliko pod 9 keV. Če torej pri obsevanju zasledimo fotone s tolikšno energijo, vemo, da je prisoten baker. Ampak v našem primeru je baker pod ometom in novorojeni fotoni ne bodo prišli na svetlo. Pogoltni jih omet. Dodatna nepremostljiva zapreka bi bila cena merilnega sistema. Pozabimo torej na XRF.

Ultrazvok. Tudi z ultrazvokom si ne moremo kaj dosti pomagati. Najprej bi morali premazati zid s primerno pasto, da bi z oddajnika sploh spravili zvok v zid, zaradi nehomogene sestave ometa pa bi bil odmev od drobne žice gotovo izgubljen med odmevi sestavin v ometu.

Doslej smo še najbolj napredovali na področju elektrike. Smo tam res izčrpali vse možnosti? Vrnimo se!

Tuljava. Če v tuljavo vtaknemo feritno jedro, se induktivnost poveča. Žal električna žica ali vodovod nimata nič skupnega s feriti. Vendar pa na izmenični tok, ki teče skozi tuljavo, vplivajo tudi kovinski predmeti v bližini. Spremenljivo magnetno polje, ki ovija tuljavo v teh predmetih inducira napetost, inducirana napetost pa požene vrtilčne tokove. To pa porablja energijo, ki jo je treba plačati. Tok skozi tuljavo, ki je pri idealni tuljavi premaknjen za 90 stopinj proti napetosti (tedaj je moč na tuljavi enaka 0) zaradi obremenitve nekoliko spremeni fazo. V električnem opisu tuljave pomeni to, da nastopa poleg induktivnosti tudi zaporedno zvezan upor. Ker pa nobena tuljava ni idealna, se ta upor doda k upor, ki ga ima že žica, s katero je tuljava navita.

Kako izkoristiti pojav pri odkrivanju električnih napeljav v zidu? Preselimo se v štirideseta in petdeseta leta prejšnjega stoletja. Tedaj so razvijali iskalce kovinskih predmetov. Tuljavi so dodali kondenzator in dobili električni nihajni krog. S primernim elektronskim vezjem in povratno vezavo so ustvarili oscilator, ki je nihal na frekvenci okoli 1 MHz. Če so tuljavo približali kovini, se je v nihajnem krogu povečalo dušenje. Zaradi tega se je nekoliko znižala oscilatorjeva frekvenca. Seveda je bila sprememba frekvence neznatna. Rešitev, kako jo zaznati, je domiselna. Naprava je vsebovala še drugi oscilator z enako frekvenco. S seštevanjem nihanj obeh oscilatorjev so dobili utripanje v območju slišnih frekvenc. Tako je bilo mogoče zaznavati spremembe frekvence celo pod pol promila.

Danes, v dobi mikroelektronike, bi bilo najbrž koristneje detektirati fazno razliko med oscilatorjem s tuljavo in referenčnim oscilatorjem s kristalom.

Kako pa bi lahko pokazali v šoli vpliv kovin na tuljavo? Dušan premore drag inštrument (sl.6), ki meri lahko ohmski upor, kapaciteto ali induktivnost.

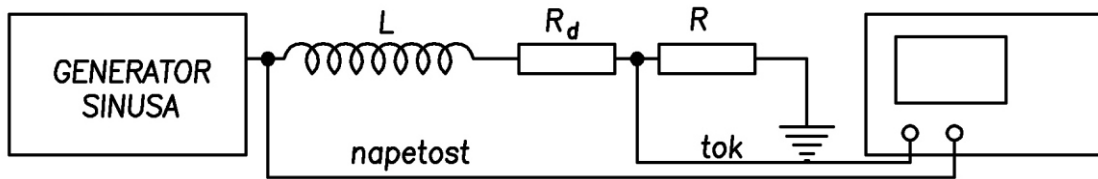
Ceneje pridemo do rezultata s parametrično predstavitvijo napetosti na tuljavi in toka skozi tuljavo s pomočjo slike na osciloskopu (sl.7).

Napetost priključimo na vhod X, tok, ki ga dobimo pa dobimo prek padca napetosti na majhnem upor, pa na vhod Y (sl.10). Da bo prikaz korekten, mora biti vrednost upora R dosti manjša od upora tuljave R_d $\frac{1}{L}$.

Za povsem natančne zapise potrebujemo vezje na sliki 8. Uporabimo



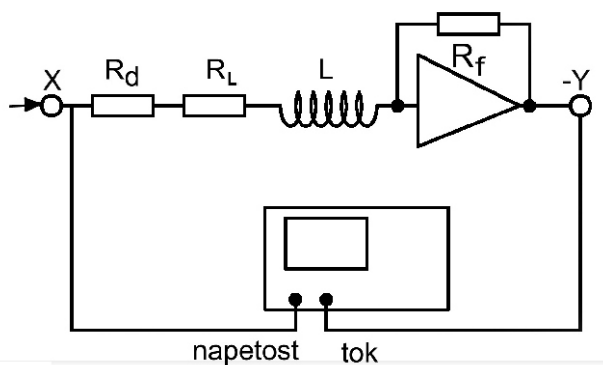
sl.6. Instrument, ki meri kompleksne upornosti



Sl.7. Slika na zaslonu osciloskopa se spremeni, če približamo tuljavi kovinski predmet

lahko katerikoli operacijski ojačevalnik, recimo TL081.

Tuljavo v iskalcu kovinskih predmetov lahko povežemo tudi v



Wheatstoneov mostiček. Danes radi uporabljamo tuljave oblike D. Takšno tuljavo dobimo, če prerežemo tuljavnik po premeru in navijemo enako število ovojev na vsako od polovic.

Kako smo prišli do lastnega mostička, kažeta naslednji sliki (Sl.9 in sl.10).

Sl.8. Parametrični prikaz signalov X in Y zagotavlja povsem verno sliko

Naša tuljava je imela induktivnost 750 H in upor $20 \text{ }\Omega$.



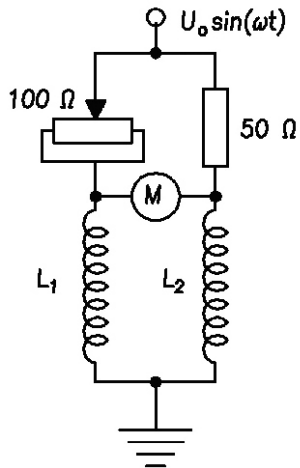
Sl.9. Izstružimo PVC v takole obliko in prežagamo po premeru



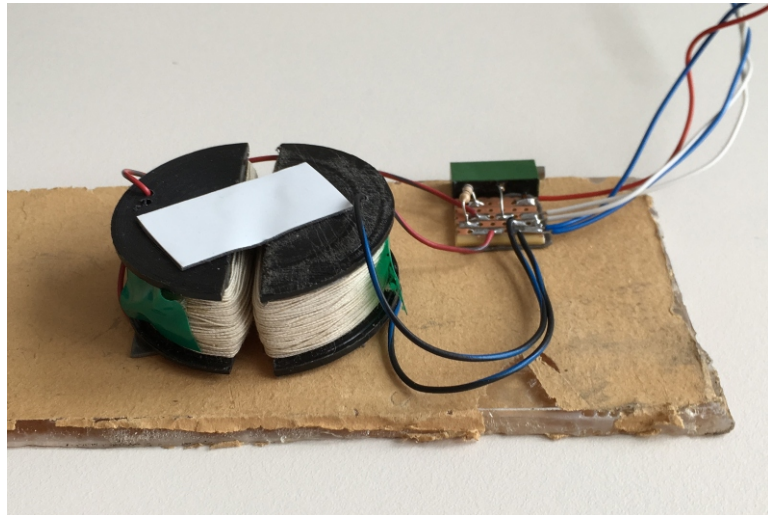
Sl.10. Tuljavnik za D tuljavo opremimo z držalom, da lažje navijemo 150 do 200 ovojev

Mostiček smo želeli napajati s harmoničnim signalom pri frekvenci 10 kHz , zato smo izračunali ustrezni R_L in L . Tako smo prišli do vrednosti elementov, ki smo jih uporabili v vezju na sliki 11.

Najlepše opazujemo razmere prek osciloskopa, ki ga vključimo namesto merilnega inštrumenta. Izkazalo se je, da mostička ne moremo popolnoma uravnovesiti prek nastavljivega upora (levo). Induktivnost obeh tuljav se je namreč razlikovala za 10 H kljub enakemu številu ovojev. Razliko bi lahko pripisali neenakemu navijanju. Razliko bi najelegantneje izničili s primernim koščkom ferita, s katerim bi tuljavi s premajhno induktivnostjo zvečali induktivnost.



Sl.11. Naš mostič



Sl.12. Tudi v živo

Pri pripravah sva si z Dušanom pomagala spet z drugim dragim merilnikom, ki si je (podobno kot sodobne kuhinjske tehtnice) zapomnil vrednost izhodne napetosti neizenačenega mostiča in jo odšteval (set zero) pri meritvah.

Naj zdaj razmišljam kot fizik, ki je zaljubljen v elektroniko. Najbrž bi bilo zanimivo napraviti mostič, kjer bi obema tuljavama vzporedno dodali še kondenzatorja. Tako nastala nihajna kroga bi vzbujali prek obeh uporov z nihanjem pri resonančni frekvenci. Po dodatnem dušenju, ki ga v tuljavo enega od krogov vnese bližina kovine, se sicer spremeni amplituda nihanja na nihajnem krogu, znatnejša pa je sprememba faze. S primernih elektronski vezjem bi merili fazno razliko med nihanjema obeh nihajnih krogov, ki je v ravnovesju sicer nič, nato pa linearno raste z dušenjem, ki ga doživlja ena od obeh tuljav.

Pulse induction. Sodobna elektronika pa ponuja še takoimenovano pulzno metodo: **PI**. V zemljo usmerimo zelo kratek električni sunek in prislušujemo odzivu. V raziskovanem področju brez kovin odziva ne bo. Kadar pa so prisotni kovinski predmeti, se v njih zbudijo vrtilni tokovi. Predmeti delujejo kot oddajne anene dokler tokovi ne zamro. Njihovo oddajanje, ki ga lahko zaznamo, sicer hitro izzveneva, vendar lahko natančna analiza odmeva pove celo, za katero kovino gre. Vse se zgodi v nekaj deset mikrosekundah, merilni sunki pa se ponavljajo nekaj stokrat v sekundi.

Nove ideje. Marsikdaj smo kaj pobarvali, da smo lažje našli. Bi morda lahko pobarvali podzemni električni kabel? Pobarvamo ga seveda električno če nanj priključimo izmenično električno napetost s frekvenco, precej višjo od omrežne, 50 Hz. Kapacitivni senzor na površini bo zaradi manjšega kapacitivnega upora $R_c = \frac{1}{C}$ deležen večjega signala. Če pa na račun priključene napetosti steče po vodniku tok, se bo v merilni tuljavici na površini inducirala večja napetost. Kadar pa je frekvenca dovolj velika, deluje kabel kot oddajna antena, ki ji lahko prisluhnemo z zunanjo anteno. Tako lahko najdemo kable tudi do metra globine.

Doslej smo uporabljali tuljavo kot senzor magnetnega polja. Poznamo pa tudi Hallov senzor. Pobrskajmo po internetu, kolikšna je lahko njegova občutljivost. Mikročipi, ki vsebujejo poleg sensorja tudi ustrezno elektronsko vezje, dajejo napetost 10 mV na gaussa. Pri današnji elektroniki bi prav lepo merili še 1 mV, torej polje 0,1 gaussa. Lahko pa se potrudimo in sledimo izmeničnemu signalu, ki ga daje harmonično nihajoč tok, z ozkopasovno tehniko. Tako bi najbrž, po mojih izkušnjah, s fazno občutljivo demodulacijo, zlahka zaznali še desetkrat manjše polje. Senzorji s Hallovo sondo namreč omogočajo sledenje polju tja do 100 kHz.

Takšno tehniko sva uporabljala z Dušanom za šolske meritve magnetnega polja in imela kot senzor tuljavico. Pri frekvenci nekaj kilohertzov sem z analogno tehniko lahko sledil magnetnemu polju ravnega vodnika s tokom 100 mA na oddaljenosti pol metra. Dušan je kasneje uporabil računalnik in digitalno tehniko, kar lahko preberete tudi v članku (1).

GMR. Naslednji pojav, ki omogoča merjenje magnetnega polja, je magnetoupornost. Napredek v zadnjem desetletju (razvoj GMR: giant magneto-resistance), kjer dobimo iz sensorja tudi nekajkrat večji odziv kot pri Hallovem efektu uvršča GMR senzor pred Halla.

Pa že izziv! Pametni telefoni imajo tudi kompas. Bi morda s takim telefonom lahko čutili polje približno enako kot je zemeljsko magnetno polje, ali pa večje? Zemeljsko polje je vredno od 0,3 do 0,7 gaussa.

Kaj pa vodovodne napeljave? Kovinska vodovodna cev je vdebuje dosti več kovine od drobne žice. Vse, kar je dobro za iskanje žic, torej kovine - bo zlahka odkrilo vodovodne cevi.

Nazadnje se poigramo z dvema iskalnikoma skritih kovin, ki ju dobimo v marsikateri trgovini z železnino, ali pa celo dostavljeno na dom prek Conrada ali Mimo vrste in podobnih.

Tako smo prišli do konca. Ampak fizik vedno išče nove poti v neznanu. Bodite radovedni fiziki tudi vi. Prav rad se vam bom pridružil, ko me najdete kot internetnika joze.pahor@fmf.uni-lj.si. Do tedaj pa lep pozdrav, Joko.

1. Priloženo. Lahko prenesete na ključek