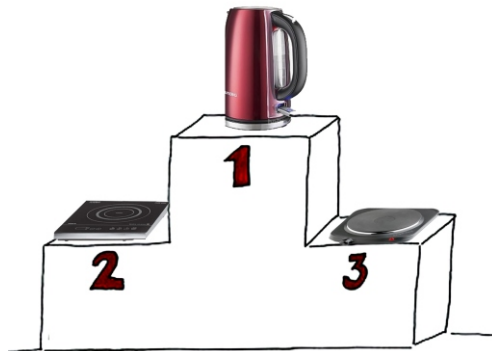


Vse o indukcijskemu kuhalniku

Priredili smo tekmovanje treh grelnikov. Indukcijski kuhalnik se je boril za prvenstvo s klasičnim rešojem in hitrim grelnikom vode.

Kljub vsem naporom ni zmagal najmlajši od udeležencev. Zmagovalni oder je bil takle:



Naš kuhalnik je zasedel šele drugo mesto. Ampak gospodinje bi sodile drugače...

Tole so rezultati našega fizikalnega sodniškega zbora:

Orodji: merilnik energije in merilnik temperature



Prvo mesto: hitri grelnik vode

Vanj smo nalili 1 kg vode. Po ustalitvi temperature smo namerili 19° C. Nato smo vključili gretje. Do temperature 93° C smo pokurili 0,045 kWh = 342 kJ. Ogreta voda je bila bogatejša za 312 kJ.

Odtod sledi izkoristek $= 312 / 342 = 91\%$.

Pri drugi meritvi smo segrevali kilogram vode od 18° C do 57° C. Tokrat je bil izkoristek 96%.

Komentar. Segrevanje poteka zelo hitro, torej ni časa, da bi izgubljali toploto s hlajenjem. Tudi toplotna izolacija lonca je odlična. Lonec je dobro pokrit, torej ne izgubljam toplote z izparevanjem. Tudi toplotna kapaciteta lonca je majhna, zato porabimo večino toplote za gretje vode in le majhen del za ogrevanje lonca.

Boljši izkoristek pri drugi meritvi gre predvsem na račun neznatnega izparevanja, saj je parni tlak vode pri 57°C še vedno majhen v primerjavi s parnim tlakom blizu vrelišča.

Drugo mesto: indukcijski kuhalnik

Razpolagali smo z dvema loncema; sivim in pikastim, ki sta si lahko delila stekleno pokrovko. Pri meritvah smo merili čas ogrevanja, moč v kuhalniku in zasledovali smo temperaturo.

1. V sivi lonc smo zlili kilogram vode pri 17° C , ga pokrili s stekleno pokrovko in ga z močjo 1560 W greli 152 sekund. Končna temperatura vode in lonca je bila 63° C.

Meritev da za izkoristek

2. Enaka meritev s pikastim loncem. Začetna temperatura vode 16° C, končna po 163 sekundah gretja z močjo 1570 W pa 66° C. Tokratni izmerjeni izkoristek

3. Pri naslednji meritvi smo segrevali vodo spet v pikastem loncu, toda brez pokrovke od začetne temperature 18° C do 67° C. Segrevanje z močjo 1570 W je trajalo 173 sekund. Zaradi večjega izparevanja in s tem izgubljanja toplote je bil izkoristek nekoliko manjši, = 76%.

Tretje mesto: kuhalnik z greto žico (rešo)

Najprej smo ogreli kuhalnik, nato položili nanj lonec s kilogramom vode pri 23° C. Z merilnikom energije ugotovili porabo 0,021 kWh za ogretje na 34,5° C, kar se je zgodilo v 60 sekundah. Odtod izračunali izkoristek = 64%.

Nadaljevali smo z gretjem. Po 16 minutah je temperatura dosegla vrednost 87° C. Porabili smo 0,138 kWh. Izkoristek je bil le še 45%.

Toplotna kapaciteta lonca

Hkrati z vodo segrevamo tudi lonec. Morda bi bilo zanimivo ugotoviti, kolikšen del vse toplote smo porabili za segrevanju lonca. Bi bilo vredno iskati lonec s čim manjšo toplotno kapaciteto?

Toplotno kapaciteto lonca C_L lahko približno določimo takole. Lonec ima sobno temperaturo T_L . V lonec zlijemo liter vode s temperaturo T_V .

Potem ko vse skupaj premešamo, izmerimo končno temperaturo T .

Voda je oddala nekaj toplote, enako količino pa jo je dobil lonec. Odtod enačba $(T_V - T)mc_p = (T - T_L)C_L$.

Tu pomeni m maso vode, v našem primeru 1 kg, c_p pa specifično toploto vode

Do ocene toplotne kapacitete pa lahko pridemo hitreje. Stehtajmo lonec! Toplotna kapaciteta bo

$$C_L = m c_{Fe}.$$

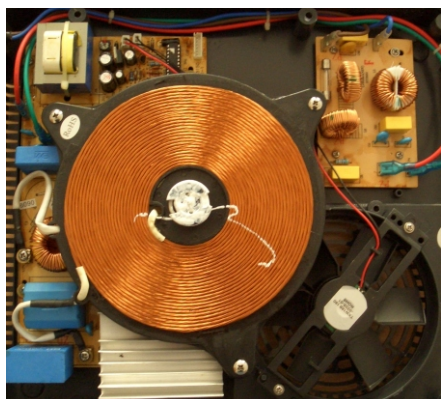
Ker je specifična toplota železa ali jekla, iz katerega je pretežno lonec, c_{Fe} , majhna v primeri s specifično toploto vode, korekcija izkoristka ne bo bistvena.

Smo radovedni fiziki...

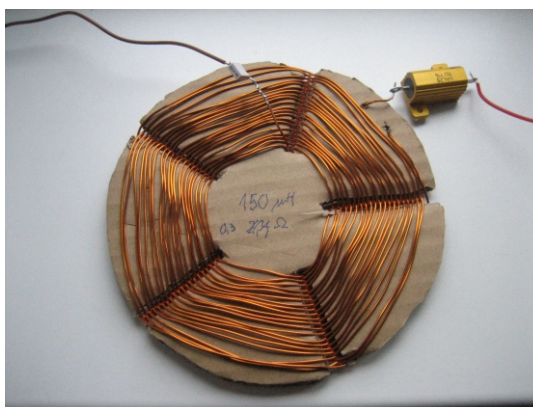
Ampak mi smo fiziki in nas bolj zanima, kako deluje indukcijski kuhalnik. Ideja indukcijskega kuhanja je preprosta. Gre za transformator. Primarna tuljava je ploščato navitje, skrito pod steklokeramično ploščo. Pod tuljavo je feritna plošča, ki pogoltne magnetne silnice, ki bi se sicer širile navzdol. Sekundarna tuljava je dno posode, ki jo položimo na steklokeramično ploščo nad tuljavo. Električno prevodno dno posode služi kot sekundarno navitje transformatorja v obliki enega samega ovoja. Ko priključimo primarno

navitje na električno napetost, se v sekundarnem ovoju inducira sicer majhna napetost, ki pa zaradi majhnega upora požene velik tok. Dno posode se greje in kuhanje se začne.

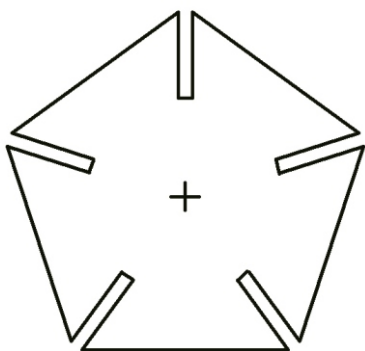
Pogled pod ploščo o indukcijskega kuhalnika kaže sl. 1.



Sl.1. Upravljanje s tuljavo terja tudi precej elektronike



Sl.3. Naša tuljavica



Sl.4. Lepenka, kamor navijamo svojo tuljavo

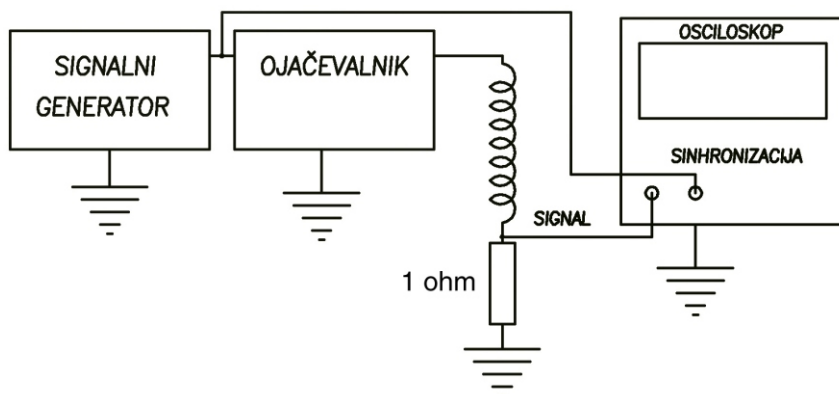


Sl.5. Preprosto dno

Da bi se nekoliko seznanili z lastnostmi take tuljave, smo si eno pripravili sami. Pred osemdestimi leti so bile priljubljene ploščate tuljave v obliki dna košare (sl 2). Žico, debelo okoli 0,8 mm smo navijali na lepenko, kot jo vidimo na sliki 4. Navita tuljava je imela induktivnost približno 150 H, pri uporu 0,4 ohma. Kako bi se tuljava vedla, če bi jo priključili na omrežno napetost 220V? Induktivni upor $R_L = \omega L$ je nekaj nad 0,1 ohma. Če temu dodamo še 0,4 ohma, kolikor je upor navitja, pričakujemo lahko tok nekaj sto amperov, ki bi ga naša napeljava ne prenesla. Treba je uporabiti precej višjo frekvenco, da bo induktivni upor bistveno večji od omskega. Pri frekvenci okoli 50 kHz, ki jo uporabljajo tudi indukcijski kuhalniki, pa bo taka tuljava primerna za naš transformator. Tedaj je induktivni upor $R_L = 2 \pi f L = 50$ ohmov povsem dominanten.

Potrebovali bomo tudi nadomestek dna posode. Vzeli smo 0,5 milimetra debelo železno pločevino, odsekali kvadrat, ki smo mu porezali še vogale in ga tako preoblikovali v osmerokotnik. Z okroglo obliko bi se veliko bolj mučili (sl.5).

Poskusi s tuljavo



Sl. 6. Raziskujemo, kaj se zgodi, ko položimo na tuljavo model lonca

Sestavimo sistem, ki ga kaže slika 6. Zanima nas tok skozi tuljavo pri signalu s frekvenco okoli 50 kHz. Zaporedno tuljavi priključimo upor $R=1$ ohm. Padeč napetosti na tem uporu, sorazmeren toku skozi tuljavo, opazujemo z osciloskopom. Uporaba sinhronizacije (external sync) omogoča, da sledimo tudi faznemu kotu med napetostjo na tuljavi in tokom skozi njo. Če je ta kot 90° , potem o toku res odloča le tuljava. Signalni generatorji vodijo pogosto signal do izhoda prek upora, ki bi soodločal o toku skozi tuljavo. Zato smo tuljavo priključili prek ojačevalnika.

Če imamo dvokanalni osciloskop, vodimo signal s tuljave na, recimo prvi kanal in uredimo sinhronizacijo tako, da vidimo na zaslonu podobo funkcije sinus. Potem privedemo signal z upora 1 ohm na drugi vhod. Fazna razlika med obema signaloma mora biti 90° .

Zdaj prekrijemo tuljavo s svojim modelom dna posode. Magnetno poljke tuljave povzročijo v kovini vrtnične tokove. Kovina se segreva. To je potrebno plačati z večjim tokom skozi tuljavo, spremeni se pa tudi fazni kot med napetostjo na tuljavi in tokom skozi njo.

Na ta način indukcijski kuhalnik presoja, če naj greje. Ko kuhalnik vklopimo, možgani kuhalnika pomerijo tok skozi tuljavo. Če je lonec na plošči, se gretje nadaljuje, sicer se izklopi, možgani pa vsakih 5 sekund preverjajo, če je lonec nared.

Obnovimo si znanje o transformatorju

Spomnimo se osnovnih enačb, ki jih poznamo za transformatorje. Za prenos energije velja, da je primarna moč enaka sekundarni. To lahko povemo tudi s tokoma in napetostima:

$$U_p \cdot I_p = U_s \cdot I_s$$

Razmerje med primarno napetostjo U_p in sekundarno napetostjo U_s pa je enako razmerju med številom navojev (N) primarne in sekundarne tuljave.

$$U_p/U_s = N_p/N_s.$$

S to enačbo si ne moremo dosti pomagati, saj je sekundarno navitje praktično v kratkem stiku. Zato razmerje med napetostima U_p/U_s nadomestimo z razmerjem med tokoma I_s/I_p , torej

$$I_s/I_p = N_p/N_s.$$

Naše sekundarno navitje N_s , ki ga predstavlja dno posode, šteje en sam ovoj, torej je sekundarni tok N_p krat večji od primarnega toka. Sekundarni tok I_s , ki teče skozi dno posode, je torej $I_s = I_p N_p$, moč pa je $P = I_p^2 N_p^2 R$, kjer je R upor dna posode. Seveda mora biti upor R zelo majhen, saj smo pri računu predpostavljali, da je sekundarno navitje praktično v kratkem stiku. Če bi lahko upor R zvečali, pa bi ta ostal še vedno neznamenit, bi lahko greli izdatneje.

To lahko dosežemo z dnom iz magnetnega materiala. Istosmerni tokovi so razporejeni po prevodniku lepo enakomerno. Izmenični tokovi, kamor lahko prištevamo tudi svojega, pa ljubijo površino. Z pomikanjem v vodnik njihova gostota eksponentno upada. Tako je toku na razpolago le tanek površinski kanal namesto vsega prevodnikovega preseka. Pojav je znan kot skin effect. Na vedenje izmeničnega toka pa poleg frekvence vpliva tudi permeabilnost snovi .

Gostota toka pada z globino x takole:

$$I(x) = I(x=0) e^{-x/\delta}$$

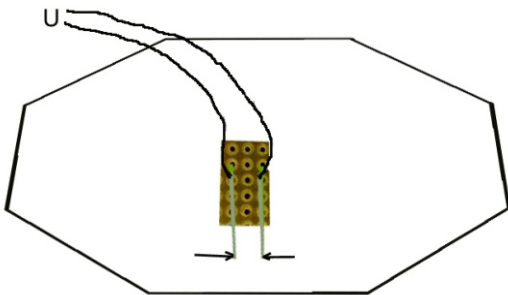
faktor δ , ki pove globino, kjer je gostota toka $e=2,71$ krat manjša kot na površini.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$$

Če torej uporabimo feroelektričen lonec namesto bakrenega, približno 50 krat povečamo upor in s tem segrevanje pri približno enakem primarnem toku.

Priznam, vse skupaj je fiziku težko sprejeti. Vendar smo pri razlagi ubrali zelo poenostavljen model. Nam fizikom zelo znane transformatorske enačbe veljajo za tisto, kar imenujejo elektrotehniki napetostni transformator, ki je povsem neobremenjen. Manj se ukvarjamo z drugo skrajnostjo; z maksimalno obremenjenim transformatorjem, ki ima sekundarno navitje v kratkem stiku. Tedaj govore elektrotehniki o tokovnem transformatorju. Med obema skrajnostima je realni transformator, ki ga opisuje vrsta diferencialnih enačb. Nekje tja, povsem blizu tokovnemu transformatorju, bi sodil tudi naš transformator. Pot do tja bi bila gotovo prezahtevna za srednjo šolo. Prišli bi do skoro enakega rezultata in bi bili srečni.

Poskusimo dokazati, da je tudi pri feromagnetnem dnu dobro izpolnjen pogoj, ki velja za tokovne transformatorje. Napetost, inducirana prek dna je nič ali skoro nič (sl.7).



Sl.7. Ugotavljanje inducirane napetosti

Pripravili smo si vilice, s katerimi lahko otipljemo napetost U na našem dnu. Na zaslonu osciloskopa z občutljivostjo 2 mV na centimeter smo izmerili napetost približno 0.2 mV, medtem ko v smeri, pravokotno na narisano ni bilo zaznati nikakršne napetosti. Tako lahko domnevamo, da veljajo razmere za tokovni transformator.

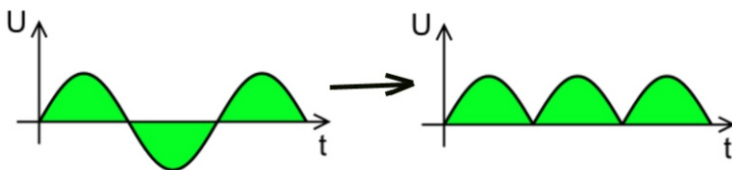
Če nimate testnega vezja, da bi napravili tipalo, lahko uporabite zamašek, ki ga prebodete z dvema buckama. Najbrž se ponuja še več rešitev. Fiziki smo iznajdljivi...

Kako do pogonske napetosti s frekvenco okoli 50 kHz?

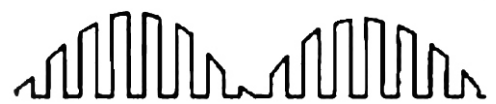
Razpolagamo z omrežno napetostjo 220V in frekvenco 50 Hz. To napetost lahko preoblikujemo v istosmerno prek Graetzovega mostiča (sl.8).

Usmerjeno napetost razrežemo in z dobljenimi sunki napajamo tuljavo (sl.9).

Seveda je to le osnovna ideja. Celotno elektronsko vezje z vsemi regulacijami je preveč zapleteno, da bi ga poskušali opisati.



Sl.8. Izmenična in usmerjena napetost

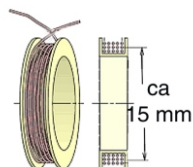


sl.9. Hribčke razrežemo, da jih bo 50.000 v sekundi

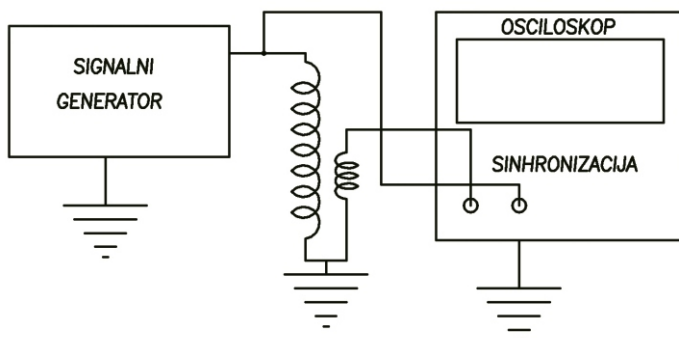
Kakšno je magnetno polje naše tuljave?

Z žico 0,2 mm si navijmo tuljavico s približno 100 ovoji (sl.10). Ko postavimo tuljavico na glavno tuljavo, se v njej inducira napetost. Napetost iz tuljavice vodimo na osciloskop kot kaže sl.11. Premikajmo tuljavico od sredine velike tuljave proti robu!

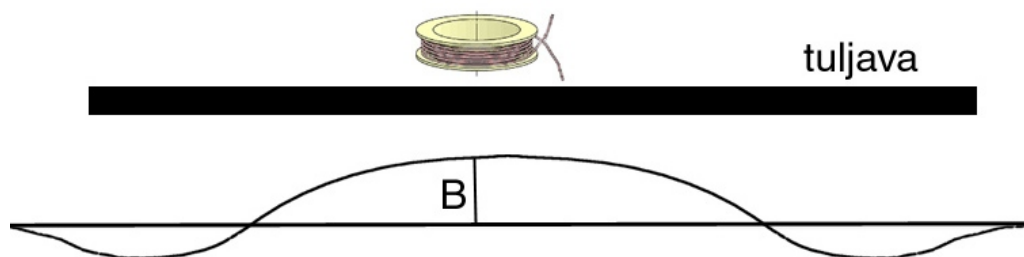
Rezultat meritve vidimo na sl.12. Nekoliko nenavadno se zdi, da nekje polje povsem izgine, a je vse skupaj vredno razmisleka.



Sl.10. Merilna tuljavica s katero ugotavljamo magnetno polje naš modelne tuljave



Sl.11. Raziskujemo magnetno polje naše tuljave



Sl.12. Raziskovanje magnetnega polja tuljave in rezultat

Za posledek: sila na lonec in posledice

Spomnimo se modela transformatorja v zbirki za pouk fizike na FMF! Na veliko cilindrično jedro smo natakneli primarno tuljavo, ki smo jo lahko priključili na omrežno napetost. Pri enem izmed poskusov smo na isto jedro natakneli še kovinski prstan, ki je predstavljal ovoj v kratkem stiku. Ko smo priključili primarno tuljavo na omrežno napetost, je prstan odletel visoko v zrak.

Morda lahko pričakujemo, da tudi na lonec na indukcijskem kuhalniku deluje sila, ki potiska lonce navzgor. Tako bi bil lonce lažji...

Pri enem od mojih kuhanj je bila indukcijska kuhalna plošča neznatno nagnjena. Pri polni moči je lonce polzel proti robu plošče. Se je morda zmanjšalo trenje zaradi manjše normalne sile, ali pa je morda klokotajoča voda povzročila tresljaje, ki so odlepili lonce in ga poslali na pot?

Raziščimo novi pojav!

Na indukcijsko ploščo sem položil kovanec, ki naj bi predstavljal ovoj v kratkem stiku in vključil tok. Nič se ni zgodilo; plošča pa se je samodejno izključila, saj kuhalnikovi možgani niso zaznali primerne obremenitve.

Poskus sem ponovil tako, da sem indukcijsko ploščo prekril z ALU folijo, ki je v rabi v gospodinjstvu. Po vključitvi toka je folijo odneslo v zrak. Morda gre za potrditev naše domneve, morda pa je dvig povzročil le ogreti zrak pod folijo?

Vsekakor bi bila potrebna temeljitejša raziskava. Vredno je razmišljati skupaj z učenci in se odločiti za najboljšo rešitev.

Pa srečno, vaš Jože Pahor