

Vrtilno magnetno polje

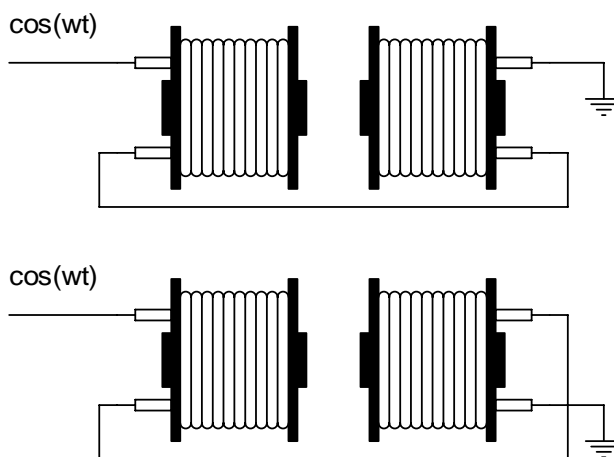
Vrtilno magnetno polje je eno od ključnih sredstev za pretvorbo električne energije v mehansko. Njegove lastnosti izrabljamo v vseh električnih motorjih na izmenično napetost, bodisi enofaznih ali trifaznih, ki jih je prvi temeljiteje raziskoval Nikola Tesla.

Za pretvorbo električne energije v mehansko uporabljamo motorje.

Električni motor za enosmerno napetost je sestavljen iz statorja in rotorja. Stator je opremljen s stalnim magnetom, na rotorju pa je več elektromagnetov, navadno trije. Če uspemo v pravem trenutku pognati tok skozi enega od elektromagnetov na rotorju, se rotor vrti. Tok mora teči skozi tisti elektromagnet, ki se pravkar približuje polu magneta na statorju. Takoj, ko je elektromagnet na rotorju tik pod polom magneta na statorju, mora tok prenehati. Za pravilen čas delovanja elektromagnetov na rotorju skrbijo krtačke, preko katerih dovajamo električni tok do elektromagnetov na rotorju. Prav krtačke so glavni vir težav pri enosmernem elektromotorju, saj na njih prihaja do iskrenja zaradi preklapljanja tokov skozi elektromagnete. Življenjska doba krtačk je omejena, prav tako krtačke ne dopuščajo velikih tokov in s tem velikih moči motorja.

Električni motor na izmenično napetost prav tako sestavljata stator in rotor. Stator je opremljen z enim ali več elektromagneti, stator pa je lahko stalni magnet (sinhronski motor) ali pa kratkostična kletka (asinhronski motor). Oglejmo si principe delovanja takih motorjev.

Vsi vemo, da se enaki poli permanentnih magnetov med sabo odbijajo, različni pa privlačijo. Enako velja tudi za izmenična magnetna polja, ki so posledica izmeničnega toka skozi elektromagnet, le da tokrat ne moremo govoriti o severu ali jugu elektromagneta, saj se pola menjata. Če uporabimo omrežno napetost za vzbujanje elektromagneta, se pola zamenjata 100 krat v sekundi (50x sever v jug in 50x jug v sever). Če elektromagneta povežemo zaporedno in ju napajamo z izmenično napetostjo, ju lahko približamo »z nasprotnima poloma« ali z »enakima poloma«. Tokrat to pomeni, da sta magnetni polji obeh elektromagnetov v protifazi ali pa v fazi. Prvič se elektromagneta privlačita, drugič odbijata. (poskus: dve tuljavi, železni jedri, zaporedna vezava, variak: odboj in privlak)



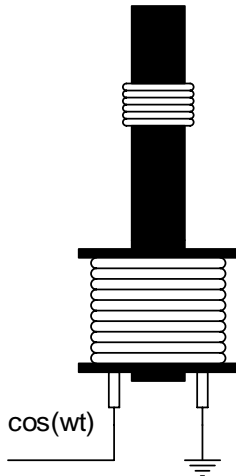
Slika 1: Odboj ali privlak elektromagnetov na izmenični tok

Izmenično magnetno polje enostavno ovrednotimo s tuljavico, ki jo vtaknemo v polje. V tuljavici se inducira električna napetost, ki se da izračunati kot:

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

Pri tem je N število ovojev tuljavice, Φ magnetni pretok skozi tuljavico, A presek tuljavice, B pa magnetno poljsko jakost. Če tuljavico kratko sklenemo, inducirana napetost v njej požene električni tok. Posledica tega toka je magnetno polje tuljavice, ki po smeri nasprotuje zunanemu magnetnemu polju. Minus v formuli pove, da ti dve magnetni polji kažeta v nasprotnih smereh, kratko sklenjeno tuljavico pa zato izrinja iz osnovnega magnetnega polja. (Poskus: tuljava, železno jedro, variak, prstan: levitacija)

Vrtilno magnetno polje - poskusi



Slika 2: *Kratkostični ovoj lebdi nad elektromagnetom v izmeničnem magnetnem polju*

Tuljavico lahko izrabimo tudi kot priročen senzor izmeničnega magnetnega polja. Priključimo jo na osciloskop in že lahko opazujemo obliko in velikost magnetnega polja. Pri tem se moramo zavedati, da opazujemo odvod magnetne poljske jakosti. Pri harmonskih poljih ne bo težav, še posebej bo enostavno pri konstantni frekvenci. (poskus: magnetno polje v okolici elektromagneta, variak, enojna tuljavica)

Inducirana napetost je odvisna od kota med osjo tuljavice in vektorjem magnetnega polja. Zaznavanje polja poenostavimo tako, da uporabimo dve pravokotno postavljeni tuljavici. Prva zaznava magnetno polje v osi x, druga v osi z. Vektorska vsota zaznanih polj je sedaj neodvisna od usmerjenosti para tuljavic, če le ne vpeljemo še tretje dimenzije. Za zdaj jo opustimo. Namesto zamudnega ročnega vektorskega seštevanja lahko uporabimo XY-zapis na osciloskopu. Tuljavici priklučimo na dva vhoda osciloskopa, ki smo ga postavili v XY način delovanja. Dolžina črte na zaslonu ponazarja velikost magnetnega polja. (poskus: magnetno polje v okolici magneta, variak, dvojna tuljavica)



Slika 3: *Pravokotno postavljeni tuljavici*



Slika 4: *Slika geometrično seštetih induciranih napetosti na zaslonu xy – osciloskopa, navadno izmenično magnetno polje*

Kaj je torej vrtilno magnetno polje? Navadno to razložimo takole: magnetno polje, ki ima stalno velikost, a se njegova pola vrtita okoli skupne osi.

Najenostavneje to ponazorimo tako, da stalni magnet, za katerega vemo, da ima stalno jakost magnetnega polja, vrtimo. (poskus: stalni magnet na rotorju elektromotorčka, zaznavanje s kompasom nad vrtečim magnetom) Tak model predstavlja sinhronski motor! Igla kompasa se vrti z enako hitrostjo kot stalni magnet pod njo. Če igla kompasa ustavimo z roko, se morda ne bo več hotela zavrteti. Treba bo upočasniti hitrost vrtenja stalnega magneta in potem zlagoma povečevati hitrost vrtenja.

Poskusimo še drugače. Nad vrteči magnet postavimo na nitko obešen kovanec. (poskus: vrteči stalni magnet, pregrada, kovanec na nitki) Tisti za 50c so prav primerni, saj ne vsebujejo feromagnetnih kovin. Kovanec se vrti! Vrtenje je počasnejše od vrtenja magneta, a ko kovanec z roko ustavimo, se sam začne ponovno vrteti ne glede na



Slika 5: *Tako naredimo vrtilno magnetno polje s stalnimi magneti*

Vrtilno magnetno polje - poskusi

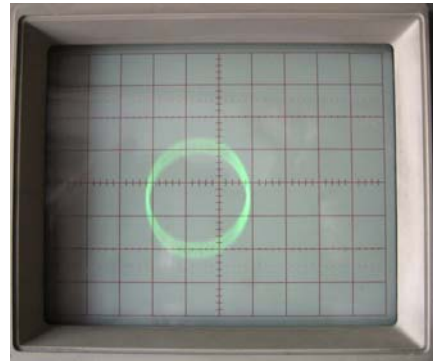
hitrost vrtenja stalnega magneta. Naredili smo asinhronski motor. Njegovo delovanje pojasni poskus z indukcijo v kratko sklenjeni tuljavi. Če se kovanec vrti z enako hitrostjo, kot vrtilno magnetno polje, se v njem ne inducira napetost. Po njegovi notranjosti zato ni toka in kovanec sukanju ne nasprotuje. Če kovanec miruje, polje pa se vrti, se v kovancu inducira napetost. Ta požene tok, ki ustvari magnetno polje, to pa skuša kovanec »umiriti«
glede na vrtilno magnetno polje. Efekt je podoben, kot pri elektromagnetni zavori, le da tokrat magnetno polje vrti, kratkostični ovoj pa se mora vrtenju prilagoditi.

Vrtilno magnetno polje enostavno zaznavamo s prej sestavljenim parom pravokotno postavljenih tuljav in osciloskopom. (poskus: detekcija vrtilnega magnetnega polja s prekrizanimi tuljavicama) Pika, ki ponazarja vektorsko vsoto v tuljavicah induciranih napetosti, kroži po zaslonu osciloskopa. Njena oddaljenost od središča je konstantna, torej ima magnetno polje konstantno jakost. Seveda, saj uporabljamo stalni magnet.

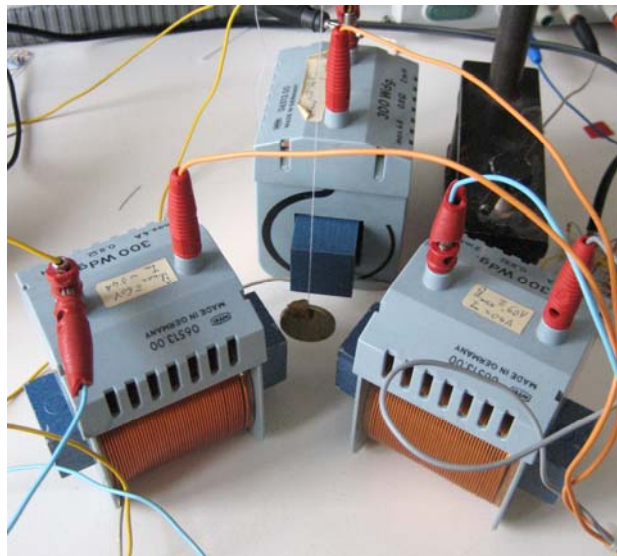
Vrtilno magnetno polje je torej sposobno zavrteti bodisi permanentni magnet ali pa v kratek stik sklenjeno tuljavico. Zadostuje tudi en sam kratko sklenjen obroč. Naredili smo torej dva prototipa motorjev.

V tehniki uporabljamo trifazne motorje. Tisti, ki ste kdaj poskusili demonstrirati njegovo delovanje, ste verjetno uporabili tri tuljave, ki so bile prostorsko razmaknjene za 120 stopinj. Za napajanje tuljav ste potrebovali trifazno napetost, ker je najverjetneje 230V iz omrežja preveč in je celo nevarno, ste morali uporabiti trifazni variak. Če imate srečo in vam je na razpolago. (poskus: tri tuljave, trifazni variak, kovanec na nitki, prekrizani tuljavici)

Ker želimo narediti poskuse bolj prijazne šoli, bomo uporabili manj nevarna sredstva. Signal za napajanje elektromagnetov lahko generiramo z računalnikom in zvočno kartico. Na razpolago je program, ki omogoča generiranje dveh harmonskih signalov poljubne frekvence in medsebojnega faznega kota. (slika) Žal zvočna kartica osebnega računalnika ne daje dovolj toka za elektromagnet, zato je treba signal pred priključevanjem na elektromagnet še ojačiti. Uporabimo lahko običajen ojačevalnik za avdio, morda ojačevalnik 2x20W/4ohm. Pri tem moramo vezati izhodno sponko ojačevalnika preko upornika 4ohm na elektromagnet. Brez upornika je ojačevalnik v preveliki nevarnosti. Žal tudi ta rešitev ne bo zadoščala, ko bomo poskusili ponarediti trifazni motor, zato raje sestavimo enostaven ojačevalnik, ki omogoča priključitev elektromagnetov na zvočno kartico računalnika. Električna shema enega kanala je na sliki 8. Razmerje upornikov R2/R1 določa ojačenje, največji dopustni tok skozi elektromagnete pa je okoli 1A. Odvisen je od hlajenja tranzistorjev. Mi bomo vsake toliko časa potipali tranzistorje in se prepričali, da lahko s poskusi nadaljujemo. Največji izhodni tok je itak omejen z elektronsko varovalko v napajalniku za ojačevalnik.

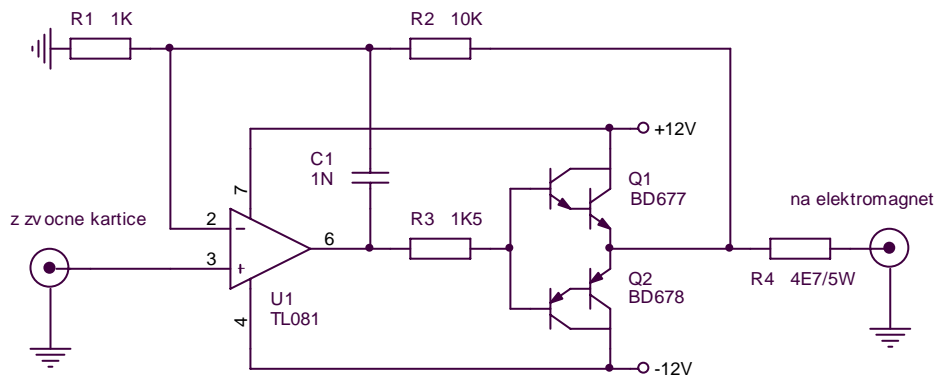


Slika 6: Slika vrtilnega magnetnega polja, detektirana s prej opisanimi pravokotno postavljenima tuljavama



Slika 7: Demonstracija trifaznega motorja s tremi tuljavami in trifaznim variakom

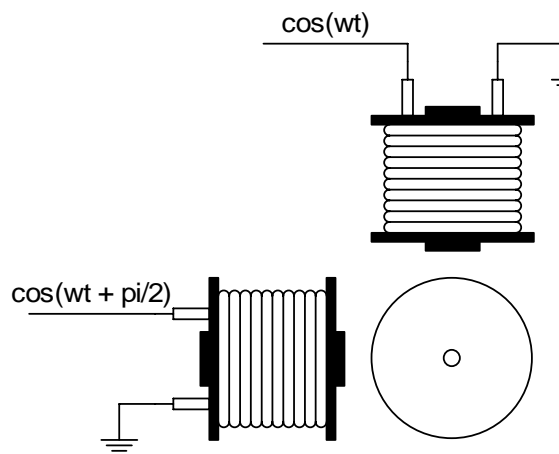
Vrtilno magnetno polje - poskusi



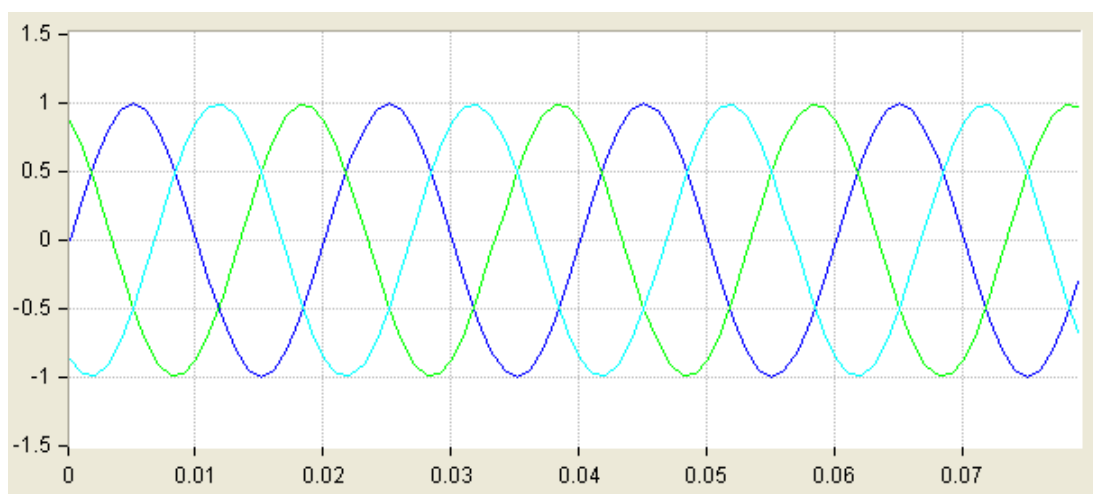
Slika 8: Ojačevalnik za en elektromagnet; na vhod ojačevalnika priključimo izhodni signal iz zvočne kartice, na izhod ojačevalnika pa elektromagnet

Vrtilno magnetno polje lahko naredimo že z dvema elektromagnetoma. Postavimo ju pravokotno, napajamo pa z napetostima, ki sta premaknjeni za 90 stopinj, slika 9. (poskus: dve tuljavi, ojačevalnik, PC, kompas -> sinhroni motor, prekržani tuljavici, kovanec na nitki -> asinhroni motor, signali na osciloskopu)

Čeprav vrtilno magnetno polje, ki ga naredimo z dvema tuljavama, omogoča sukanje rotorja, je električno gledano delovanje slabo. Bolje bo, da poskusimo s pravimi tremi tuljavami trifaznega sistema, ki jih napajajo trije signali, premaknjeni za po 120 stopinj. (slika 10) Zvočna kartica računalnika daje le dva signala, potrebujemo še enega za tretjo tuljavo. Na srečo lahko tretji signal sestavimo iz prvih dveh tako, da ju seštejemo in vsoti obrnemo predznak.



Slika 9: Dvofazni asinhroni motor

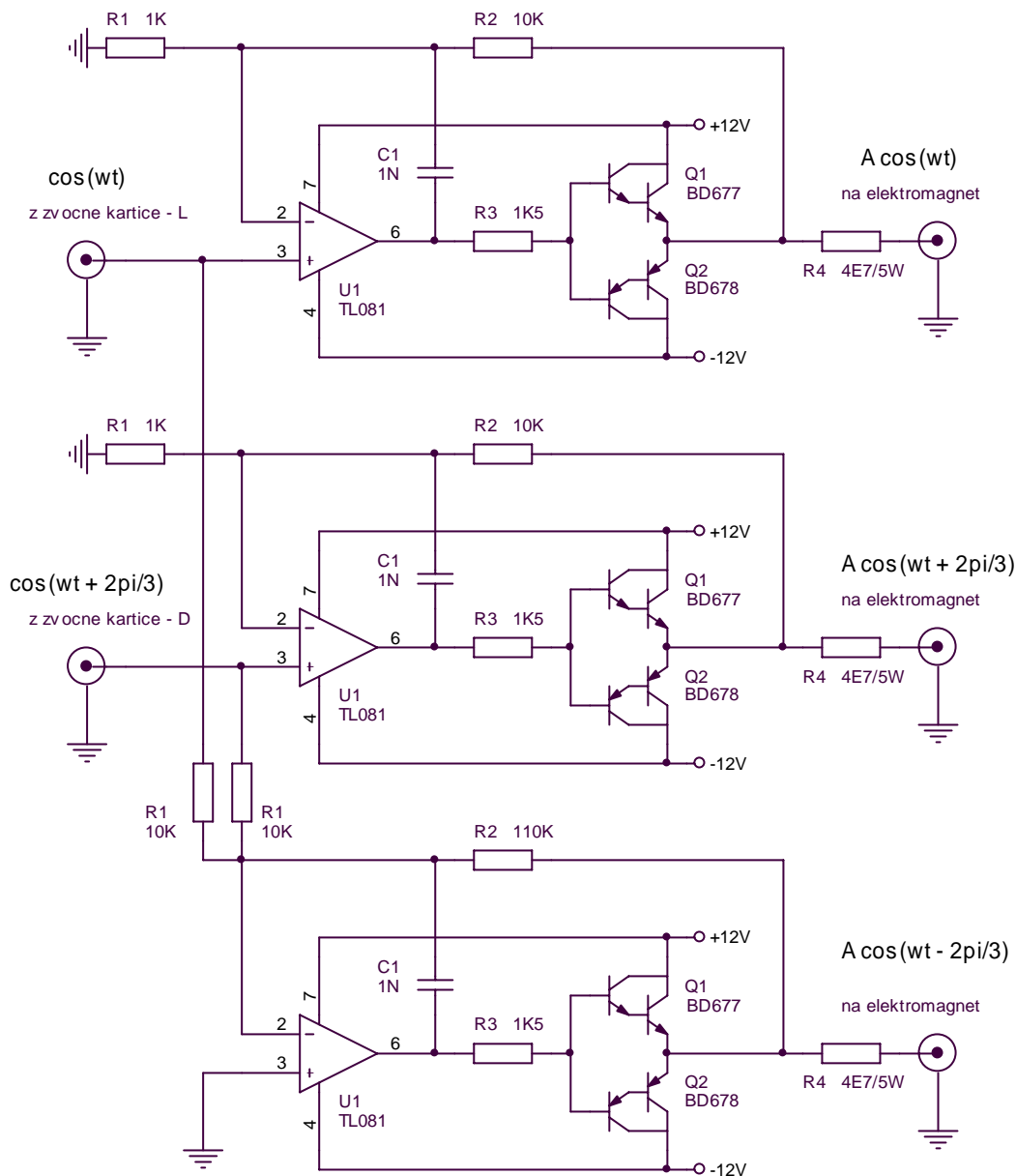


Slika 10: Časovni potek trifazne napetosti, posamezna barva predstavlja eno fazo; horizontalna os: čas v sekundah, vertikalna os: relativna napetost

Vrtilno magnetno polje - poskusi

$$\begin{aligned} -[\cos(\omega t + 0) + \cos(\omega t + 2\pi/3)] &= -\cos \omega t - \cos \omega t \cos 2\pi/3 + \sin \omega t \sin 2\pi/3 = \\ &= \cos \omega t \cos 2\pi/3 + \sin \omega t \sin 2\pi/3 = \cos(\omega t - 2\pi/3) \end{aligned}$$

Vezje, ki z računalnikom generirana, za 120 stopinj premaknjena, signala sešteje in vsoti obrne predznak je na sliki 11, na sliki 10 pa je časovni potek vseh treh signalov. (poskus: računalnik, seštevanje, slika na osciloskopu)

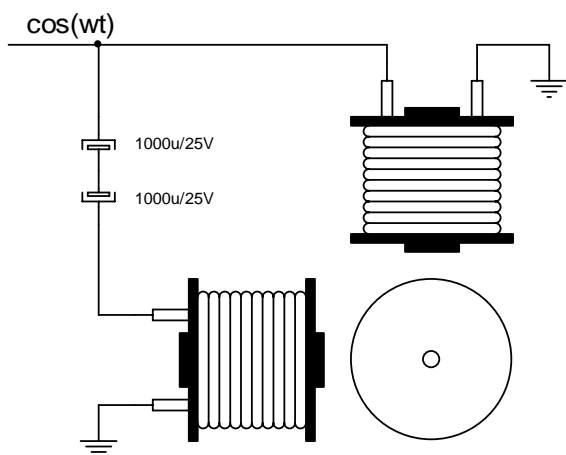


Slika 11: Električna shema vezja, ki generira tretjo fazo in ojači signale

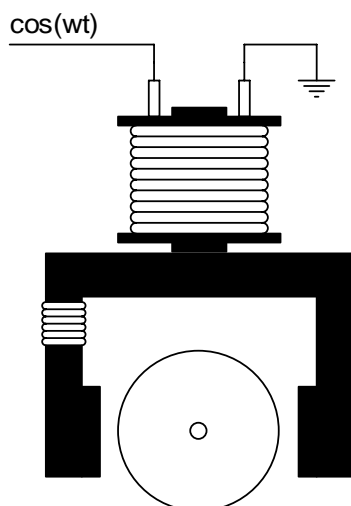
Namesto trifaznega variaka bomo uporabili računalnik in elektronsko vezje seštevalnika / ojačevalnika s slike 11, s katerim bomo napajali tri tuljave. (poskus: PC, ojačevalnik, tri tuljave, kompas, kovanec na nitki, prekržani tuljavi, priključitev zvezda / trikot)

Pogosto uporabljamo motorje, ki so delani za eno samo fazo. Tam očitno ne moremo narediti vrtilnega magnetnega polja zaradi fazno zakasnenih pogonskih napetosti. Ali pač?

Vrtilno magnetno polje - poskusi



Slika 12: Vezava dveh elektromagnetov, eden je vezan preko kondenzatorja. To povzroči vrtilno magnetno polje



Slika 13: Vrtilno magnetno polje naredimo lahko tudi tako, da »zasenčimo« del kotve elektromagneta s kratko sklenjenimi ovoji



Slika 14: Tuljava za poskuse

Fazo toka skozi elektromagnet lahko spremenimo s kondenzatorjem, ki ga vežemo zaporedno z eno od dveh tuljav, shema 12. Izbrati je treba primerno kapacitivnost, ki zagotavlja dovolj velik fazni kot med tokovoma skozi obe tuljavi. (poskus: dve tuljavi, PC ojačevalnik, dva kanala vzporedno, ena faza, kondenzator, prekrižani tuljavi, kovanec na nitki)

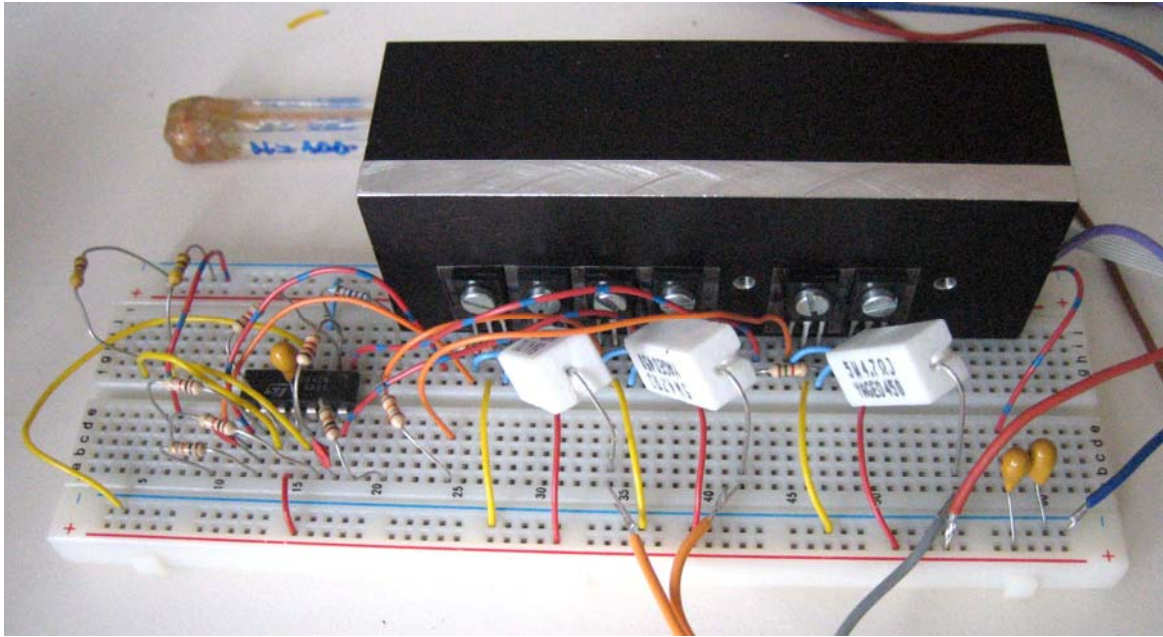
Pri nekaterih motorjih zakasnijo tudi fazo vektorja magnetnega polja pod delom kotve elektromagneta. Tehnika se imenuje zasenčenje polov elektromagneta. Pol elektromagneta razdelimo v dva dela, lahko z vzdolžnim žaganjem pola. Nato okoli enega dela razdeljenega pola naredimo kratkostični ovoj. Ta ovoj pobere del magnetnega polja, zato je polje pod tem, osenčenim delom pola šibkejše. Pomembneje pa je, da je magnetno polje pod tem delom pola tudi fazno premaknjeno glede na polje pod neosenčenim delom pola. (poskus: tuljava, vzbujanje s PC in ojačevalnikom, dva kanala vzporedno, ista faza, U kotva, kratek stik okoli enega roglja, prekrižani tuljavici, kovanec na nitki)

Na sliki 13 je shematsko prikazano, kako je mogoče osenčiti pole in narediti vrtilno magnetno polje. V pravih motorjih bi rotor postavili med oba pola, pri tem bi dele obeh polov osenčili.

Material za ojačevalnik: vrednosti elementov so podane v shemi, vse skupaj je sestavljeno na protoploščici dimenzij 12cm x 5cm. Tranzistorji so pritrjeni na hladilno telo, ki je bilo odvitno iz odvečnega napajalnika za računalnik. Cena tako sestavljenega ojačevalnika ne presega 20€.

Uporabljene tuljave so vzete iz šolskega kompleta, ki je namenjen poučevanju elektromagnetizma in transformacije. Tuljave imajo po 300 ovojev žice, skozi njih lahko pošljemo največ 4A toka, slika 14.

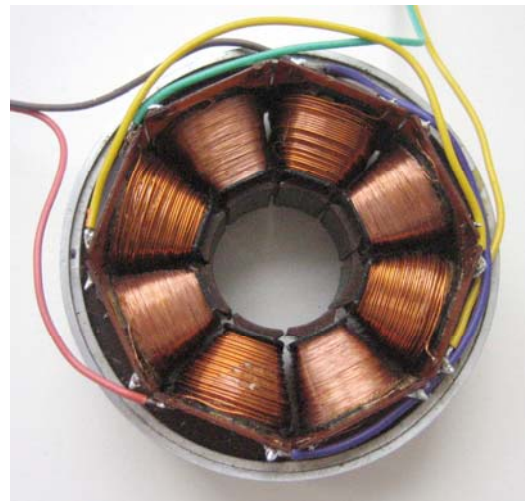
Sledi še nekaj slik, ki lahko olajšajo izvedbo poskusov v šoli, slike 15 do 19.



Slika 15: Na prototipni plošči sestavljen trifazni ojačevalnik, v ozadju tuljavica za detekcijo

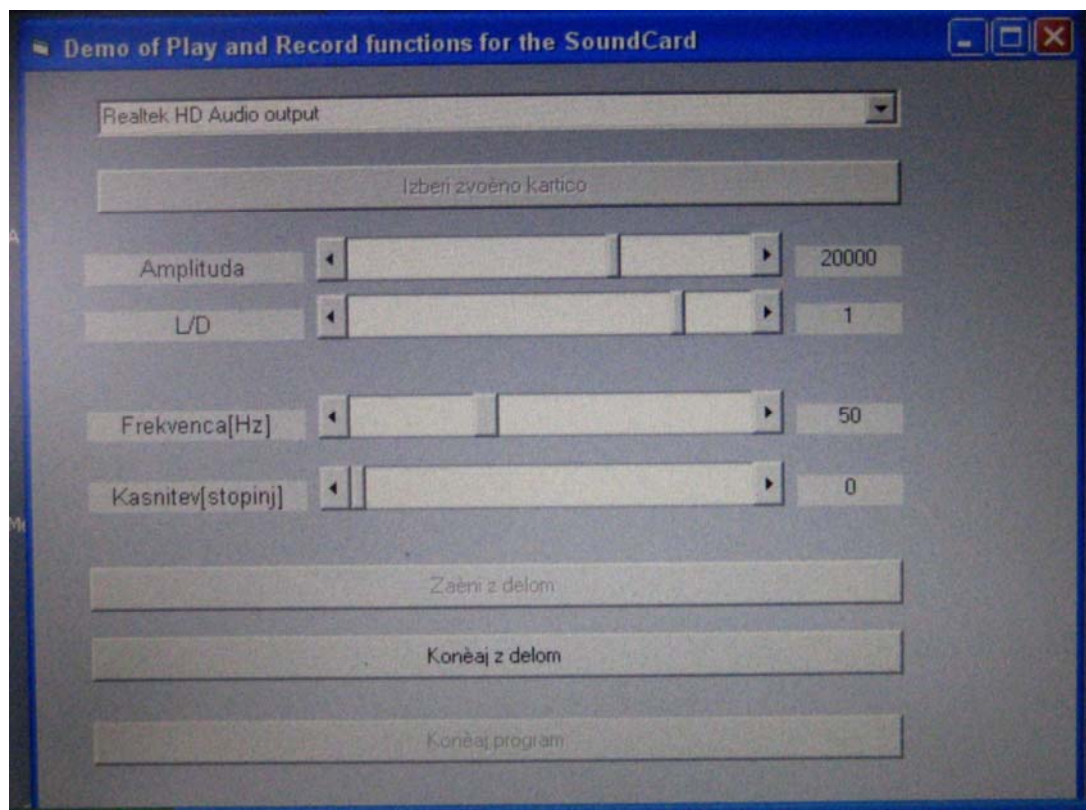


Slika 16: Kratkostični ovoj za zasenčenje pola

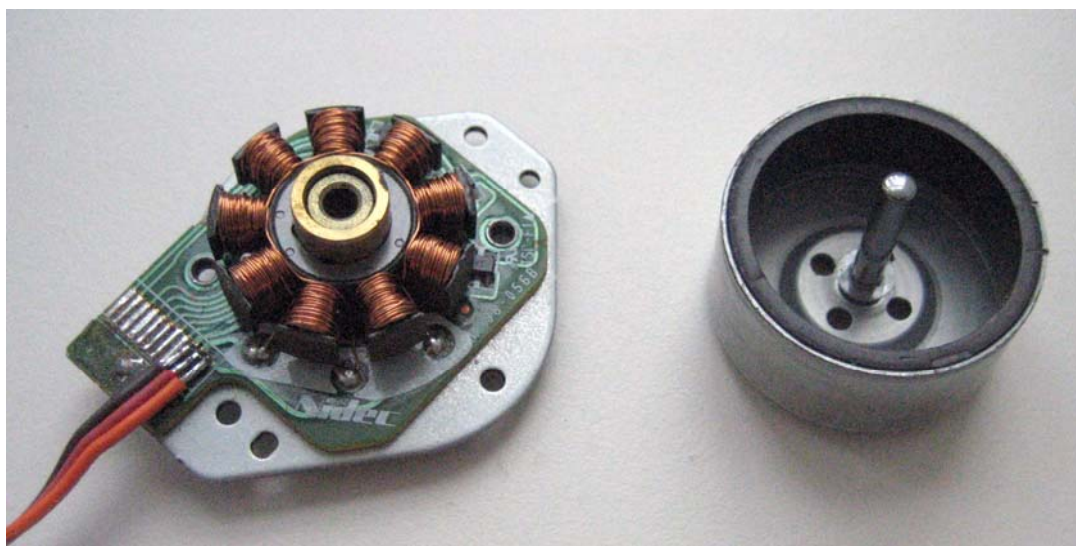


Slika 17: Dvofazno navitje

Vrtilno magnetno polje - poskusi



Slika 18: Program za generiranje signalov z zvočno kartico – dve fazi, poljubna amplituda in frekvenca ter faza



Slika 19: Mali industrijski sinhroni trifazni motorček in starega računalnika