

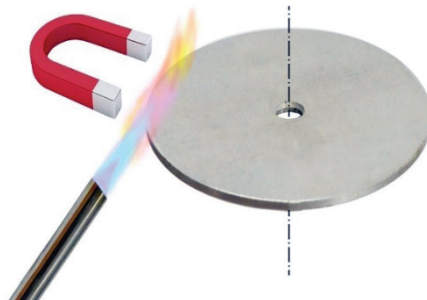


Curieov motor

Andrea Belamarić¹

1. Uvod

Kad se feromagnet nalazi u magnetskom polju postaje magnetiziran te na njega djeluje sila u smjeru pojačanja magnetskog polja. Ali ako se feromagnet zagrijava, privlačna sila magnetskog polja na njega se postupno smanjuje, a na dovoljno visokoj temperaturi (tzv. Curieova temperatura) potpuno nestaje. Kada se feromagnet ponovno ohladi, magnet ga ponovno privlači. Ovaj efekt reverzibilnog smanjenja privlačne sile magneta s porastom temperature može se popularno demonstrirati konstrukcijom tzv. Curieovog motora (slika 1, [3]). Disk od feromagnetičnog materijala koji se može slobodno okretati oko svoje osi, postavi se u magnetsko polje te se zagrijava jedan njegov dio. Kad se ovaj dovoljno zagrije, magnet će jače privlačiti nezagrijavani dio diska što će izazvati moment sile i rotaciju diska od hladnog dijela prema zagrijavanom.



Slika 1. Model Curieovog motora, [3].

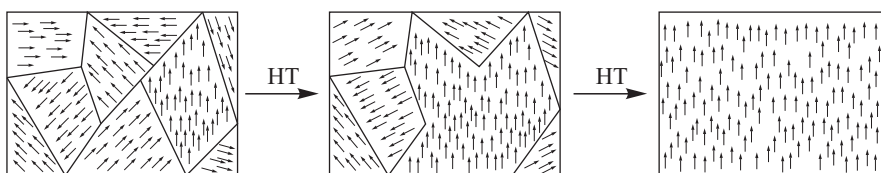
Predmet ovog rada je proučavanje te pojave teorijski, a potom i eksperimentalno. Osnove magnetizma, privlačna sila magneta i njezina ovisnost o temperaturi bit će ukratko teorijski obrađene, u poglavlju broj 2. Poglavlje 3 obrađuje više eksperimenata koji provjeravaju teorijske spoznaje, a uključuju i samu konstrukciju i demonstraciju Curieovog motora. U radu je korišten permanentni magnet zbog jednostavnosti rada s njim, a kao feromagnetski materijal korišten je nikal, kod kojeg se efekt smanjenja sile zapaža na nižim temperaturama nego kod željeza, pa je time jednostavnije izvesti eksperimente. Rad dodatno razmatra je li i pod kojim uvjetima Curieov motor pogodan za primjenu u praksi.

¹ Autorica je učenica XV. gimnazije u Zagrebu; e-pošta: belamaric.andrea@gmail.com
Mentor: Domagoj Plušćec, Istraživački centar mladih.

2. Teorija

2.1. Osnovno o teoriji magnetizma

Svaki je atom feromagneta magnetski dipol. Drugim riječima, feromagnet je sastavljen od dipola (atoma) od kojih svaki ima južni i sjeverni pol, što je posljedica neujednačenog broja elektrona u ljuskama. Unutar feromagneta atomi su podijeljeni u domene, skupine atoma orijentiranih u istom smjeru, složenih tako da se sile poništavaju. Kada se feromagnetski materijal nađe u magnetskom polju, svi atomi okreću svoj sjeverni pol prema južnom polu magneta, odnosno svoj južni pol prema sjevernom polu magneta (slika 2, [1]). Sada i feromagnet “dobiva” sjeverni i južni pol, okrenut suprotnim polom prema permanentnom magnetu. Zato magnet privlači feromagnete, [1].



Slika 2. Magnetske domene na nemagnetiziranom, djelomično magnetiziranom i magnetiziranom materijalu.

2.2. Privlačna sila magneta

Kad se feromagnetski materijal (npr. željezo ili nikal) nađe u magnetskom polju, on se magnetizira pod utjecajem tog polja i na njega posljedično djeluje magnetska privlačna sila. No ponašanje sile u magnetskom polju znatno je složenije od ponašanja sile u gravitacijskom ili električnom polju. U gravitacijskom polju sila djeluje na masu koja se nalazi u njemu, proporcionalna je s masom i jačinom polja i djeluje u smjeru polja. Isti je slučaj s djelovanjem sile na naboj u električnom polju. Za razliku od toga, u magnetskom polju sila na feromagnetski materijal djeluje u onom smjeru u kojem se magnetsko polje najviše povećava (magnetske silnice najviše zgušnjavaju) i proporcionalna je s tim povećanjem. Nadalje, sila privlačenja magnetskog polja proporcionalna je i s magnetizacijom feromagneta (što je opet posljedica samog polja). Magnetizacija feromagneta \vec{M} raste s porastom magnetskog polja, ali samo dok ne dođe do zasićenja, a ta se ovisnost ne može izraziti matematičkom formulom. Osim toga, magnetsko polje permanentnog magneta u prostoru poprima oblike koje nije moguće opisati jednostavnim matematičkim formulama (za razliku od npr. opadanja gravitacijskog polja s kvadratom udaljenosti) što ovo proučavanje čini još složenijim.

Matematički izraz za izračun sile u magnetskom polju na feromagnet općenito glasi

$$\vec{F} = \nabla(\vec{m} \cdot \vec{B})$$

pri čemu je:

- \vec{B} gustoća magnetskog toka, (složena vektorska funkcija koja za svaku točku u trodimenzionalnom prostoru daje veličinu i smjer gustoće magnetskog toka), mjeri se u teslama [T]

- \vec{m} je “magnetski moment” koji se dobije prostornim integriranjem (sumiranjem) “magnetizacije” \vec{M} preko cijelog volumena feromagneta za kojeg se određuje sila, mjeri se u amper-metrima-kvadratnim [$A\ m^2$]
- ∇ je “nabla operator” – koji iz skalarnog produkta $\vec{m} \cdot \vec{B}$ računa vektor sile \vec{F} temeljem promjena iznosa u smjeru maksimalne promjene (gradijenta) funkcije na koju djeluje.

S obzirom da magnetsko polje općenito nije homogeno, ukupnu silu na tijelo u magnetskom polju treba izračunati integriranjem elementarnih sila koje djeluju na elementarne komadiće tijela (dovoljno male da se nalaze u homogenom magnetskom polju) preko njegovog volumena. Takav integral sila različitih veličina i smjerova dat će ne samo rezultatnu silu na tijelo nego i rezultatni moment koji ga zakreće. Ta se pojava lako može opaziti ako se feromagnetski materijal postavi u blizini magneta pod nekim kutom: magnet će ga privlačiti i ujedno ga zakretati.

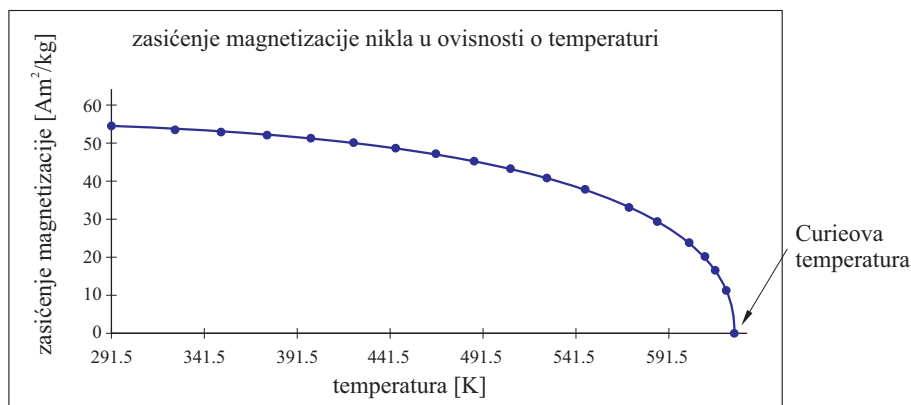
Osim toga, feromagnetski materijal u magnetskom polju zbog svoje veličine sam djeluje na modifikaciju oblika magnetskog polja koje djeluje na njegove dijelove pa je zbog tog povratnog utjecaja materijala u polju na oblik samog polja takvo proučavanje gotovo nemoguće izvesti analitički te je potrebno koristiti numeričke i empirijske modele.

Zbog ove razine složenosti zadržat ćemo se na načelima i empirijskim rezultatima.

2.3. Promjena svojstva feromagnetskog materijala zagrijavanjem

Ako se feromagnetski materijal zagrijava, atomi se počinju intenzivnije gibati pri čemu mogu promijeniti smjer svoje magnetizacije. Atomi u magnetskim domenama (objašnjenima u poglavlju 2.1) više nisu dosljedno posloženi u istom smjeru i efekt privlačenja od magnetskog polja slabi. Taj efekt postaje izraženiji porastom temperature i na tzv. Curieovoj temperaturi (specifičnoj za svaki materijal) materijal u potpunosti gubi svoja magnetska svojstva.

Sljedeći graf (slika 3, [2]) prikazuje ovisnost zasićenja magnetizacije o temperaturi. Iz grafa se vidi da magnetizacija \vec{M} (objašnjena u poglavlju 2.2) na višim temperaturama prije dolazi u zasićenje.



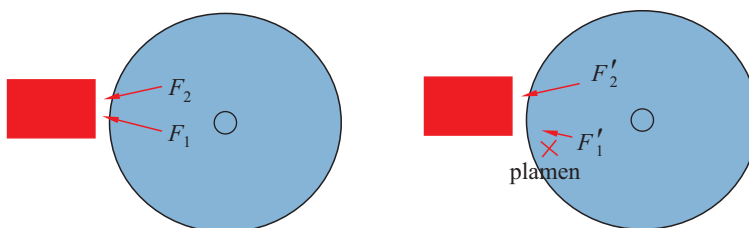
Slika 3. Graf ovisnosti magnetizacije nikla o temperaturi, [2].

Curieova temperatura, iznad koje nikal više uopće nije moguće magnetizirati, iznosi 631 K (358 °C), [2], ali se efekti slabljenja magnetskih svojstava zamjećuju i na znatno nižim temperaturama.

2.4. Curie Point Engine – konstrukcija motora

Motor koji radi na temelju efekta slabljenja magnetizacije zagrijavanjem, tzv. *Curie Point Engine* konstruiran je tako da se nikal zagrijava na jednoj strani magneta. Sila kojom magnet privlači zagrijavanu stranu diska se smanjuje dok sila na stranu koja se ne zagrijava ostaje ista. Zbog razlike sila disk se počinje vrtjeti prema grijanoj strani. Time novi dio hladnog diska dolazi pod plamenik i njegovim se zagrijavanjem efekt nastavlja. Disk se vrti relativno sporo tako da se grijani nikal stigne ohladiti dok ponovo dođe do magneta.

Da bi efekt smanjenja sile zagrijavanjem došao do izražaja i omogućio vrtnju Curieovog motora, potrebno je da magnetsko polje bude dovoljno jako i/ili temperatura grijanog nikla dovoljno visoka. Magnetizacija nikla na niskoj temperaturi mora biti dovoljno visoka – viša od zasićenja magnetizacije na postignutoj visokoj temperaturi. U protivnom neće doći do slabljenja magnetske privlačne sile.



Slika 4. Shema sila na disku i magnetu – disk sobne temperature (lijevo) i disk zagrijavan na plameniku (desno).

Slika iznad prikazuje privlačnu silu magneta koja djeluje na pojedine dijelove diska. Na slici lijevo vidi se da su sile na dva komadića nikla jednako udaljena od magneta jednake, jer su jednake temperature. Kad jednu stranu diska zagrijemo (desno), sila na tom dijelu slabi, te zbog toga dolazi do okretanja diska.

3. Eksperiment

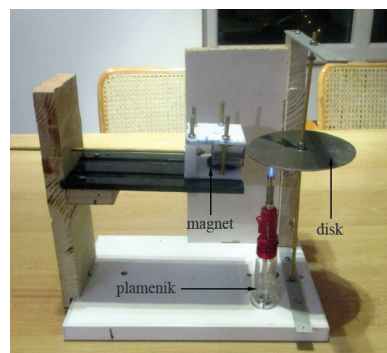
U proučavanju ove pojave pojavljuje se čitav niz zanimljivih eksperimenata kojima bismo mogli provjeriti teorijske postavke. Svakako je najzanimljivije demonstrirati sâm motor, ali je za njegovo razumijevanje i računanje parametara potrebno napraviti još nekoliko jednostavnijih i pomoćnih pokusa. Ovdje su navedeni učinjeni pomoćni pokusi, uz detaljnu razradu konstrukcije motora:

br.	eksperiment	svrha
1	mjerenje magnetskog polja permanentnog magneta	utvrđivanje parametra magneta za provjeru ostalih koraka
2	mjerenje ovisnosti privlačne sile magneta na nikal ovisno o udaljenosti od magneta	provjera privlačenja nikla od magneta $\vec{F} = \nabla(\vec{m} \cdot \vec{B})$
3	mjerenje ovisnosti privlačne sile magneta na nikal ovisno o temperaturi nikla	provjera efekta smanjenja privlačne sile ovisno o temperaturi
4	konstrukcija motora i demonstracija vrtnje	demonstracija vrtnje
5	mjerenje snage korištenog grijača	račun iskoristivosti motora
6	mjerenje trenja korištenog diska na konstrukciji	račun iskoristivosti motora

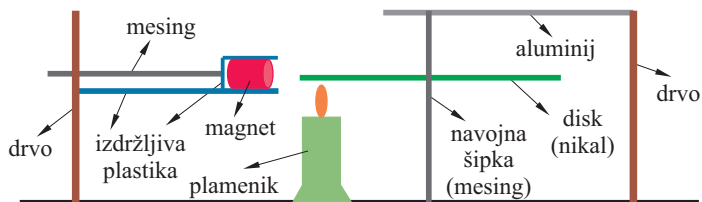
Tablica 1.

3.1. Konstrukcija motora i demonstracija vrtnje

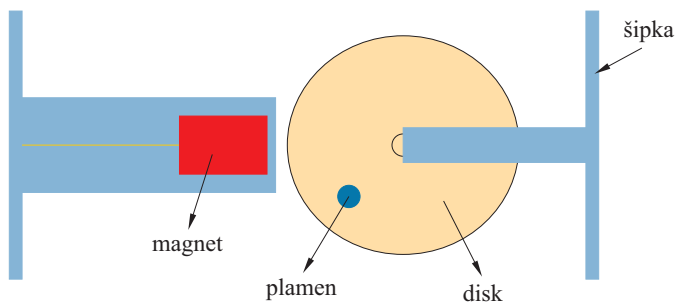
Curieov motor (slike 5, 6 i 7) konstruiran je od niklenog diska debelog 1 mm promjera 10 cm, plamenika i magneta. Disk je postavljen na kuglični ležaj, kroz koji je provučena navojna šipka. Potporna konstrukcija načinjena je od nemagnetičnih materijala: aluminija, pleksiglasa, mesinga i drveta, a korištene su i matice od nehrđajućeg čelika koje nisu magnetske. Držać magneta napravljen je tako da se lako može podešavati udaljenost magneta od diska na optimalnu udaljenost: kako bi magnet bio što bliže disku zbog jačeg polja, a ne bi bio u doticaju s plamenom i izgubio magnetska svojstva. Magnet je fiksiran u držaču tako da se ne može pomicati, a trenje između njega i držača povećano je stavljanjem gume.



Slika 5. Curieov motor.



Slika 6. Shema Curieovog motora (bokocrt).



Slika 7. Shema Curieovog motora (tlocrt).

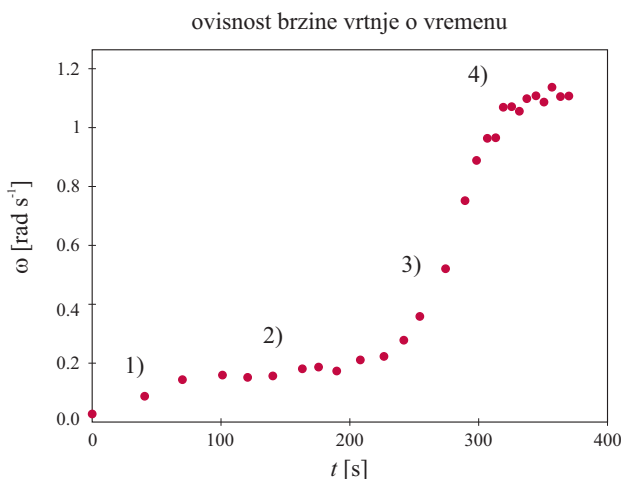
3.2. Vrtanja diska

Disk se na početku vrti u “skokovima”. Neko vrijeme miruje pa se onda pokrene i ponovo zaustavi. Onda se nakon nekog vremena ponovo pokrene pa zaustavi i tako dalje. To se može jednostavno objasniti time što se disk vrti bez opterećenja. Kad se jedan dio dovoljno zagrije da razlika u privlačnoj sili magneta postane veća od trenja disk se pokrene. Kad se ugrijani dio udalji od magneta sile su izjednačene, ali se disk i dalje neko vrijeme vrti zbog inercije dok ga ne zaustavi trenje. Nakon toga se postupak ponavlja.

Nakon što se disk zagrije vrti se brže i kontinuiranije. To objašnjava krivulja zasićenja (slika 3, [2]): u području viših temperatura jednaka razlika temperature će davati veću razliku u zasićenju magnetizacije pa time i sile, dakle za jednaku razliku sile – onu koja je dovoljna da se suprostavi trenju diska – potrebna je manja razlika temperature.

Povećanjem snage grijača motor se vrti brže. To je zato što se komadi diska brže zagriju na temperaturu koja je dovoljna da se osjeti efekt razlike sile.

Na grafu (slika 8) prikazan je primjer vrtnje diska.



Slika 8. Graf vrtnje diska.

Možemo ga podijeliti u četiri faze:

- 1) početno ubrzanje
- 2) stacionarna brzina
- 3) ubrzanje zbog povećanja snage grijača
- 4) veća stacionarna brzina.

Disk se počinje vrtjeti sa sobne temperature, a zatim se vidi kako efekt zagrijavanja utječe na povećanje brzine. Nakon što se brzina stabilizira, povećala se snaga grijača, nakon čega disk ponovno ubrjava i dostiže višu stacionarnu brzinu.

Snaga korištenog grijača je određena kalorimetrijski i dobivena je srednja vrijednost

$$P = (55.2 \pm 2.6) \text{ W.}$$

Ovaj će rezultat biti korišten u računu iskoristivosti. Može se smatrati vrlo sličnim stvarnoj snazi jer je plamenik na isti način zagrijavao nikal i mjerenu posudu s vodom.

Moment trenja određen je pomoću kutne akceleracije usporavanja diska. Disk je sniman kamerom, tako da je svakom položaju crte na disku (oko položaja punog kruga) pridružen prijedni kutni put θ u ovisnosti o vremenu t . Pretpostavljen je konstantan moment trenja i jednoliko usporeno kružno gibanje, a dobiveni su rezultati:

$$\text{kutno ubrzanje: } \alpha = 3.56 \text{ rad/s}^2$$

$$\text{moment inercije diska: } I = 8.74 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2$$

$$\text{moment sile trenja: } M = I \cdot \alpha, M = 3.11 \cdot 10^{-4} \text{ Nm.}$$

4. Diskusija

4.1. Konstrukcija Curieovog motora u praksi

Ovdje opisan motor demonstrira proučavani efekt, konstruiran je prema uputama i napravljen krajnje jednostavno. Ako bi cilj bio napraviti što bolji Curieov motor trebalo bi razmotriti nekoliko tehnoloških poboljšanja i uzeti u obzir ograničenja.

Curieov motor nije pogodan za mala opterećenja jer se u tom slučaju vrti nejednolikom brzinom. Kako motor radi na principu razlike temperature feromagnetskog materijala, a za grijanje i hlađenje je potrebno određeno vrijeme, Curieov motor može raditi jedino na malim brzinama.

Za povećanje iskoristivosti motora, bilo bi bolje umjesto diska rotor konstruirati kao obroč. Na taj bi se način bolje iskorištavala toplinska energija zagrijavanja; toplina se ne bi rasipala na dijelove diska koji su udaljeniji od magneta, a bliže središtu diska. Na te dijelove zbog veće udaljenosti od magneta djeluje slabija sila, a bliže su centru rotacije pa daju i slabiji moment.

Potrebno je magnet što više približiti disku kako bi na njega djelovalo jače magnetsko polje, ali paziti da se što manje zagrijava.

Ovakav motor ima znatne gubitke zato što je nikal dobar vodič topline i nije moguće grijati samo jedan dio. Tu bi pomogla konstrukcija diska (obruč) od više segmenata koji bi bili međusobno odvojeni toplinskom izolacijom. Ako bi motor radio na višim temperaturama trebalo bi razmotriti i hlađenje diska (to bi dalo veći moment, ali manju iskoristivost).

Kao i kod svih toplinskih strojeva trebalo bi razmotriti mogućnost da se izgubljena toplinska energija dalje koristi.

4.2. Moguća iskoristivost Curieovog motora

Iskoristivost motora koji je konstruiran u ovom radu je neznatna. Plamenik predaje disku snagu od oko 55 W.

Korisna snaga se može izračunati kao $P = M\omega$ što uz izmjerene parametre: moment trenja u praznom hodu $M = 3.11 \cdot 10^{-4}$ Nm, 10 s za jedan krug $\omega = 0.628$ rad/s daje tek neznatnih $P = 0.195$ mW.

Svakako je zanimljivo teorijski razmotriti kolika bi bila maksimalna iskoristivost Curieovog motora kada bi se maksimalno iskoristile sve mogućnosti i savršeno svladali svi tehnološki izazovi.

Analiza sila i rotacije diska je vrlo složena, obzirom da su pojedini komadići diska različito udaljeni od magneta i različite temperature. Zato je ovo razmatranje napravljeno na pojednostavnjenom modelu stroja, koji će i dalje dati valjan odgovor na pitanje teorijski maksimalne korisnosti u idealnim uvjetima izvedbe.

U ovom modelu se umjesto rotirajućeg diska koristi komad nikla kojeg permanentni magnet privlači i pritom daje mehaničku energiju. Kad se nikal zagrije može se vratiti u početni položaj ulažući manju energiju nego što je dobivena od magneta na nižim temperaturama nikla. Ako se nikal zagrije do Curieove temperature, može se udaljiti od magneta teorijski bez uloženog rada, svladavajući samo silu trenja.

Analogno s Carnotovim ciklusima toplinskog stroja s idealnim plinom, i u ovom Curieovom stroju je moguće definirati nekoliko faza u ciklusu koji se ponavlja (tablica 2) Zbog jednostavnosti, za početak je pretpostavljeno grijanje od sobne do Curieove temperature.

faza	opis	uložena energija	dobivena mehanička energija
1	nikal je na temperaturi od 290 K, na početku ciklusa na udaljenosti d od magneta, magnet privlači nikal do kraja i pritom daje mehaničku energiju	0	integral sile $\vec{F} = \nabla(\vec{m}\vec{B})$ na putu pomicanja nikla (oznaka d)
2	nikal se zagrijava do Curieove temperature od 627 K	$E = mc(T_2 - T_1)$ (m = masa nikla)	0
3	nikal se na temperaturi od 627 K (privlačna sila magneta na nikal iznosi 0) vraća u početni položaj iz faze 1	0	0
4	nikal se hladi na temperaturu od 290 K	0	0

Tablica 2. Razmjena energije u kružnom procesu idealnog "termomagnetskog" stroja.

Uz pretpostavku iz eksperimenta u poglavlju 3 uloženi rad za grijanje nikla bi bio

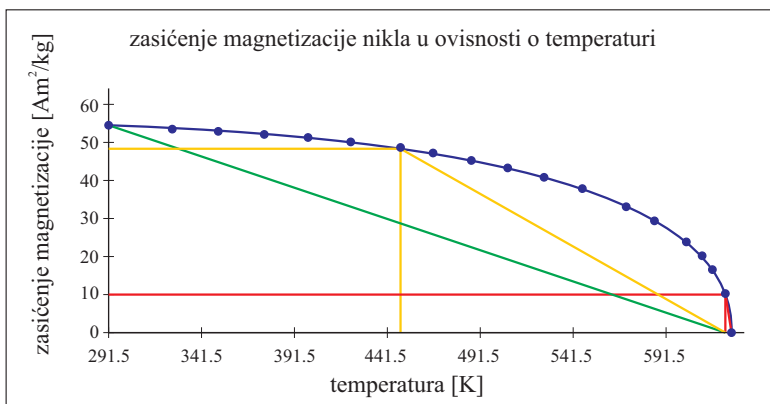
$$W = mc\Delta T = 0.002 \cdot 445 \cdot (627 - 290) = 299.93 \text{ J.}$$

Dobiveni rad bi bio integral sile po udaljenosti od magneta ili površina ispod krivulje $F(d)$ ovisnosti privlačne sile o udaljenosti. Numeričkom integracijom tih podataka, izračunat je rad od približno 0.027 J što daje tek neznatnu iskoristivost.

Iskoristivost ovog idealnog stroja je

$$\epsilon = 0.00009.$$

Iskoristivost dana u ovom primjeru ne ovisi o masi, s obzirom da i uložena i dobivena energija linearno rastu s masom.



Slika 9. Graf ovisnosti zasićenja magnetizacije o temperaturi – usporedba promjene temperature i promjene zasićenja magnetizacije.

Iskoristivost može biti znatno veća ako se zagrijavanje i hlađenje nikla ne odvija na cijelom području od sobne do Curieove temperature nego u užem području na višim temperaturama. Dobiven rad proporcionalan je razlici magnetizacije na višoj i nižoj temperaturi, a uložena energija proporcionalna je razlici temperatura. Iskoristivost je veća kad se za istu razliku temperatura dobije veća razlika u magnetizaciji, a taj odnos reprezentiran je na grafu nagibom dužine koja spaja dvije točke na krivulji. Taj odnos će biti najpovoljniji u području blizu Curieove temperature. U primjeru reprezentiranom crvenom linijom na grafu zasićenje od $10 \text{ Am}^2/\text{kg}$ postiže se na temperaturi koja je približno 7 K niža od Curieove. Kao što je prikazano u tablici 3, na taj način se postiže iskoristivost približno 9 puta veća od one koja se postiže grijanjem i hlađenjem od sobne temperature do Curieove.

primjer	razlika zasićenja iznosa magnetizacije ΔM	$T_{\text{niža}}$	$T_{\text{viša}}$	ΔT	$\frac{\Delta M}{\Delta T}$
1	54	291.5	631	339.5	0.16
2	10	624	631	7	1.43
omjer efikasnosti	–	–	–	–	9.0

Tablica 3. Omjer efikasnosti rada Curieovog motora na različitim temperaturama.

Ali i ta 9 puta veća iskoristivost i dalje ima red veličine od 0.0001.

Iskoristivost bi se mogla dalje povećavati korištenjem jačeg magnetskog polja, ali to povećanje ne ide unedogled, [5], pogotovo ne u svijetu permanentnih magneta koji ne troše energiju. Dakle, na ovaj način se ne bi mogao napraviti motor suvisle iskoristivosti.

Zaključak

U radu je obrađeno nekoliko zakonitosti magnetizma i pokazani su praktični rezultati. Ovisnost sile na feromagnetni materijal o jakosti magnetskog polja (\vec{B}) provjerena je eksperimentom i rezultati odgovaraju teoriji u granicama preciznosti mjerenja.

Ovisnost zasićenja magnetizacije nikla (\vec{M}) o temperaturi provjerena je indirektno preko ovisnosti sile o temperaturi. I ovdje su eksperimentalni rezultati u skladu s teorijom, no odstupanja su nešto veća zbog većeg utjecaja nesavršenosti eksperimentalnog postava (hlađenje nikla od okolnog zraka, ograničena preciznost mjerenja temperature u ovom postavu).

Curieov motor jasno demonstrira teoriju, ali zbog više razloga nije pogodan za korištenje u praktične svrhe (mala brzina vrtnje, mala snaga, mala iskoristivost, složena konstrukcija). Stoga ne može konkurirati ostalim motorima i strojevima i ostaje samo lijep primjer fenomena promjene magnetičnosti s temperaturom.

Zahvale

Zahvaljujem se Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu na posudbi opreme, posebno profesoru Bojanu Trkulji sa Zavoda za osnove elektrotehnike i električka mjerenja, Zavodu za primijenjenu fiziku i Istraživačkom centru mladih.

Literatura

- [1] R. CAREY, E. D. ISAAC, *Magnetic domains and techniques for their observation*, The English University Press Ltd, London, (1966).
- [2] <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/ferromagnetic/curie-weiss.php?printable=1>
- [3] <https://www.youtube.com/watch?v=mjI2A0jIJMs>
- [4] http://www.ieemagnetics.org/index.php?option=com_content&view=article&id=118&Itemid=107
- [5] E. Y. TSYMBAL, *Magnetic properties of materials*, poglavlje 16, https://unlcms.unl.edu/cas/physics/tsymbal/teaching/SSP-927/Section%2016_Magnetic_Properties_2.pdf
- [6] D. J. GRIFFITHS, *Introduction to Electrodynamics* (3. izdanje), (1998), poglavlje 6.1.
- [7] H. DANAN, A. HERR, A. J. P. MEYER, *New Determinations of the Saturation Magnetization of Nickel and Iron*, *Journal of Applied Physics* **39**, 669, (1968), <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.2163571>