

O TERMOMAGNETSKIM MECHANIZMIMA J. STEFANA i N. TESLE

(Prikaz jednog problema iz historije fizike i tehnike)

D. Pejnović, (Zagreb)

1. — U drugoj polovici 19. stoljeća postojao je aktuelan fizikalni i tehnički problem, izum aparata i stroja, kojim bi se iz ugljena direktnim putem dobivala električna energija, bez posredovanja parostroja i dinama, i uz to s većim korisnim efektom nego što ga daje ova metoda. Načinjeno je u to vrijeme više vrsta termoelektričnih baterija, koje su neki smatrali konkurentima dinamostroja i prozvali ih transformatorima topline u električnu struju. No mjerenja su pokazivala, da je korisni efekt ovih aparata vrlo malen. Proizvedena električna energija može iznositi samo nekoliko tisućinaka potrošene toplinske energije. Godine 1895 napisao je W. Ostwald, da elektrokemija ima riješiti problem posve novog dobivanja električne struje.

Jedan pokušaj rješenja ovog pitanja osnovan je na poznatom svojstvu magnetiziranog željeza, koje u užarenom stanju gubi magnetizam i ne može se magnetizirati kod visoke temperature. Iskorištenjem tog svojstva konstruiran je znatan broj termomagnetskih mehanizama, njihala, kotača, motora, generatora. Prikazat ćemo ovdje rad Stefana i Tesle na tom području uzevši u obzir radove ove vrste nekih drugih stručnjaka onog vremena. Ovaj sporedni rad naših dvaju stručnjaka zadržat će historijsku i didaktičku vrijednost. U srednjoškolskoj i sveučilišnoj obuci fizike vrijedno je izvesti eksperimente s pojednostavljenim Teslinim njihovom i Stefanovim kolom.

2. — Stefan je već 1871 upozorio, da naglo grijanje i hlađenje željeza, koje se nalazi u magnetskom polju, može poslužiti za trajan pogon nekog mehanizma i vršenje mehaničke radnje. U raspravi „Ueber die Gesetze der elektrodynamischen Induktion“¹⁾ dokazuje on, da specifična toplina magnetiziranog željeza mora biti veća nego nemagnetičnog, slijedećim stavkom: ako komad željeza, koje se nalazi u polju permanentnog mag-

¹⁾ Sitzungsber. d. K. Akademie, Bd. 64, Wien (1871). Cit. prema ondašnjem austrijskom časopisu ZS. f. Elektrotechnik V, str. 452, Wien (1887).

neta, dovođenjem topline W_1 izgubi magnetizam, onda se on može maknuti u veliku daljinu bez vršenja radnje. Oduzmemo li sada željezu toliku toplinu W_2 , da ono dobiva početnu temperaturu, magnet će ga privući. Kad bi bilo $W_2 = W_1$, nastala bi radnja iz ničega. Slijedi, da je $W_1 > W_2$, odnosno da magnetizirano željezo ima veću specifičnu toplinu nego demagnetizirano.

U vrijeme izuma dinamo stroja i jačeg razvoja elektrotehnike radio je mnogo na ovom problemu Edison. Rezultate svojih istraživanja iznio je na jednom predavanju u američkom društvu za unapređenje nauke (1886)²⁾. Jedan Edisonov piromagnetski motor, grijan s dva Bunsenova plamenika i hlađen zračnom duvaljkom, radio je sa snagom $1,5 \text{ kg} \cdot \text{m}$ u sek. (= 700 jedinica „stopafunt u minuti“). Druge njegove konstrukcije motora bijahu izložene na svjetskoj izložbi u Parizu (1889). Prema jednoj njegovoj procjeni, za rasvjetu od 30 ondašnjih žarulja (po 16 svijeća) u nekoj zgradi trebao bi piromagnetski generator težak 2 do 3 tone. Za tu svrhu imao bi se upotrebiti višak toplinske energije ugljena, koji kod centralnog grijanja zgrade ostaje neiskorišten. Edison je držao, da je moguće ovom metodom postići veću ekonomičnost nego što je imaju strojevi u kaloričkim električkim centralama onog vremena. Mnoge slabe strane Edisonova zaključivanja iznio je bečki inženir J. Popper³⁾. Za totalni intenzitet djelovanja izvodi on računom vrijednost $\sim 0,01$; radi oksidacije i inkrustacije željeznih dijelova, koje nastaju žarenjem, mogao bi se takav stroj vrlo kratko vrijeme uzdržati u pogonu.

U to vrijeme obradio je teoretski i eksperimentalno fizikalnu stranu ovog problema J. Stefan⁴⁾. Mjesto željeza, s kojim nije mogao postići dovoljno brze promjene temperature, uzima Stefan nikalj, koji gubi magnetizam kod mnogo niže temperature (360°C). Na predavanju u bečkom fizikalno-kemijskom društvu demonstrirao je on dva školska aparata, *termomagnetsko njihalo* i *termomagnetsko kolo*⁵⁾.

Prvi aparat naliči poznatom Waltenhofenovom njihalu. Kao leća njihala služi ovdje 16 cm duga, 16 mm široka, u luk svinuta traka od tankog nikaljeva lima, učvršćena na kraju lagane prečke od žute mjedi. Središte trake u položaju mirovanja nalazi se među polovima čeličnog magneta, koji radi simetrije

²⁾ Prijevod tog predavanja izašao je u ZS. f. Elektrotechnik, V, str. 447, Wien (1887).

³⁾ ZS. f. Elektrotechnik V, str. 451, Wien (1887).

⁴⁾ Stefanova rasprava „Ueber thermomagn. Motoren“ izašla je u Wien. Berichte 97, str. 70 (1888), zatim u Annalen d. Phys., N. F. 38, str. 427, (1889).

⁵⁾ Dr. L. Čermelj u opsežnoj svojoj radnji „J. Stefan, življenje in delo velikega fizika“ (Ljubljana, 1950) navodi kao datum tog predavanja 1. II. 1877. Prema članku J. Poppera (ZS. f. Elektrotechnik V, str. 455) držano je to predavanje u zimi 1886/7.

djeluje na obje polovice trake jednakim silama protivnog smjera. Ako se sad traka na jednom mjestu izvan središta plamenikom dovoljno ugrije, ona se pomiče na stranu tako, da među magnetne polove dolazi udaljeniji hladni njezin dio. Pomicanje traje, dok teža ne kompenzira magnetsko privlačenje. Njihalo onda skrene na protivnu stranu, pa poslije nekoliko nepravilnih njihaja uspostavi se pravilno njihanje. Na gornjoj strani prečke, iznad osi, nalazi se pomični uteg, kojim se udešava trajanje njihaja potrebno za ohlađivanje.

U drugom Stefanovu aparatu mjesto svinute trake dolazi kolo od nikalja, koje se može okretati u vertikalnoj ravnini oko svog središta. Ako se užari dio kola, koji se nalazi među magnetskim polovima, stavlja se ovo u kontinuiranu vrtanju. Takav aparat s promjerom od 16 cm, načinjen od nikaljeve trake, široke 2,7 cm, debele 0,3 mm, rotirao je brzinom jedan okret u sekundi.

U teoretskom razmatranjima izvodi Stefan formulu, u kojoj dolazi promjena temperature željeza, koje adiabatiskim procesom ulazi u magnetsko polje, kod čega mu se temperatura povisi. Neka je $T_1 - T_0$ prirast temperature kod stavljanja željeza u magnetno polje, T_2 temperatura užarenog željeza u polju. Adiabičkim izvlačenjem iz polja dobiva se nešto niža temperatura T_3 , a iza toga neka se željezo ohladi na početnu temperaturu T_0 . Označimo li sada sa α_1 specif. toplinu željeza u polju, sa α_2 onu izvan polja, izlazi za toplinu, koja se troši kružnim procesom, izraz:

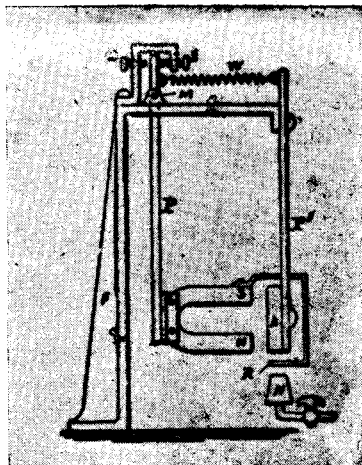
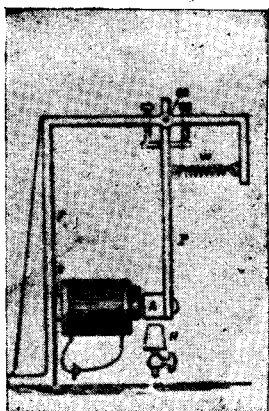
$$\int_{T_1}^{T_2} \alpha_1 dT - \int_{T_0}^{T_3} \alpha_2 dT.$$

Ova je toplina ekvivalentna proizvedenoj radnji.

3. — Nešto kasnije objelodanio je svoj rad na tom području Tesla (1889), koji je ušao u Edisonov laboratorij 1884 i radio u njem kratko vrijeme. On je konstruirao i iskušao dva ovakva „kalorička aparata“ i iznio veći broj nacrti (dijagrama), koji pokazuju druge moguće izvedbe⁶⁾. Jedan Teslin aparat pokazuje slika 1, koja ne treba mnogo razjašnjenja. Sastavni su dijelovi elektromagnet, njihalo sa željeznom kotvicom (A), uređaj za udešavanje amplitude njihaja, spiralno pero (W) i plamenik (H). Kad plamen užari kotvicu, ona se od magneta otkine, zanjiše i ohladi. Elektromagnet je sada ponovno privuče i pojav se ponavlja.

⁶⁾ U djelu: C. Martin—Maser, Nikola Tesla's Untersuchungen über Mehrphasenströme, str. 435—439 (1895) ima 11 slika Teslinih njihala, i drugih termomagnetskih uređaja. Teslini termomagnetski aparati bili su zaštićeni patentom. Slike 1, 2 i 3 su fotografske reprodukcije iz ovog djela.

U drugoj Teslinoj konstrukciji (sl. 2.) njiše permanentni („stacionarni“) magnet *NS* sa željeznom pločicom *R*, učvršćenom na polu *S*, a kotva (*A*) ostaje nepomična. Dok ploča *R* nije dovoljno ugrijana, kotva privlači i pridržava njihalo s magnetom, a iza užarenja ga otpušta. Ponovno privlačenje slijedi iza ohlađenja kotve. — U nekim konstrukcijama uzdržava se kretanje mehanizma pomoću zglobova, petlji, posebnih poluga



Sl. 1 i 2 — Teslina termomagnetska njihala (izvorni oblici)

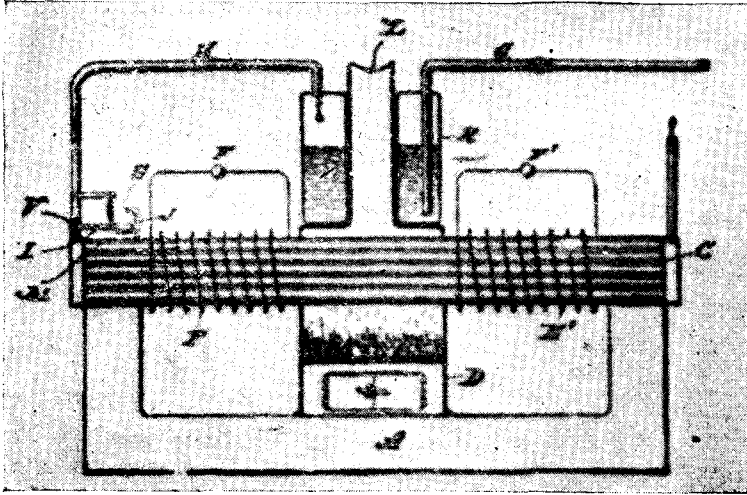
i drugih pomagala. Zanimljiv je Teslin pokus, kod kojega željezni lim, svinut u obliku slova *L*, slijedeći brze temperaturne promjene, oscilira s frekvencijom 400–500 titraja u minuti.

Direktno dobivanje električne energije iz topline očituje se u Teslinoj konstrukciji *piromagnetskog generatora*. Sl. 3. pokazuje centralni vertikalno uzdužni presjek aparata, kojemu dajemo kratki opis⁷⁾. S *A* je obilježen permanentni magnet, čiji su polovi premošteni svežnjem željeznih cijevi s uzvojnica, u kojima se inducira struja. *D* označuje peć, pomoću koje se može užariti srednji dio cijevi i time prekinuti zatvoreni magnetski krug. Iznad peći nalazi se kotlić *K* s vodom, koja se dovodi kroz cijev *G*, dok iz druge cijevi *H* izlaze pare, koje svojim prolazom mogu ohladiti i užareni dio željeznih cijevi. Pomoću ventila *V* regulira se prolaz i zaustavljanje mlaza para, a tim i brzina magnetskih fluktuacija.

4. — U literaturi onog vremena dolazi stavak: Djelovanjem vanjskih (primarnih) sila nastaju u svakom mehanizmu nultarne reverzibilne poremetnje, koje mogu izvesti nove vanjske

⁷⁾ C. Martin, cit. d., str. 440.

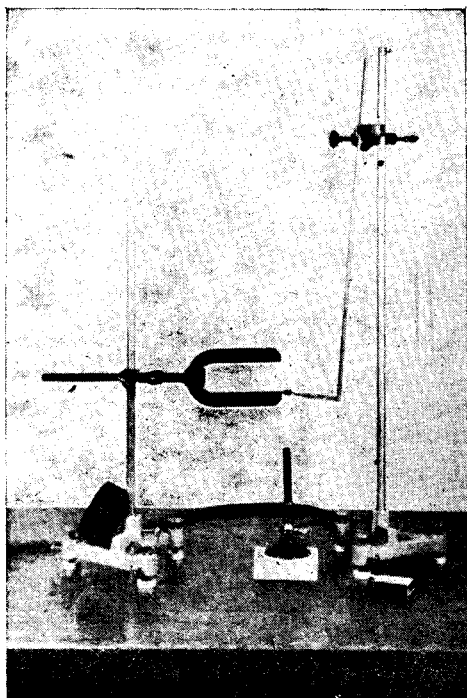
učinke. Kod termomagnetskih strojeva primarno vanjsko djelovanje potječe od topline, unutarnje poremetnje se očituju u smanjenju magnetske permeabilnosti, a proizvedeni vanjski učinci nastaju radi gubitka magnetske privlačnosti i mogu poslužiti za vršenje mehaničke radnje. Stefan je već 1871 primijenio ovaj stavak za pogon termomagnetskih mehanizama.



Sl. 3 — Shema Teslinog piromagnetskog generatora

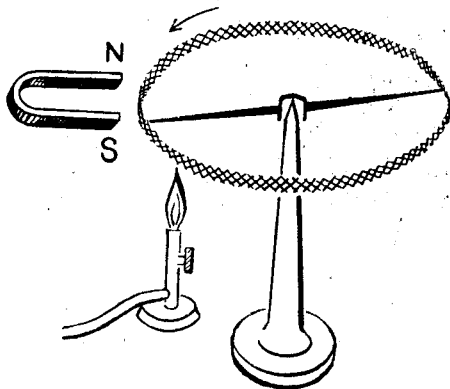
5. — U vrijeme, kad su Stefan i Tesla izvodili ova istraživanja, nije bilo posve poznato kako željezo mijenja žarenjem fizikalna svojstva: gustoću, magnetičnost, permeabilnost, specifičnu toplinu, koeficijent rastezanja i dr. Tek prije 3 decenija je pronađeno, da žarenjem nastaju 4 modifikacije: α , β , γ i δ -željezo i da prelazne temperaturne točke zavise u velikoj mjeri o primjesi ugljika. Za kemijski čisto željezo slijede ove točke redom: 765° , 898 , 1400° C. Dok je na pr. za paramagnetično β -željezo specifična toplina 0,22, za feromagnetično α -željezo ona iznosi 0,11 (kod nižih temperatura). Ovo je razlog da se proces kod prelaza $\beta \rightarrow \alpha$ ima uzeti kao prelaz modifikacije s većom energijom u takvu s manjom energijom. Kod tog se oslobađa toplina, a tim se tumači poznati pojav rekalescencije željeza. Do utjecaja dolaze ovdje promjene kristalografske strukture, što se pronašlo 1922 pomoću rentgen-skih zraka.

6. — Sl. 4 i 5 pokazuju dva jednostavna aparata, koji se mogu lako načiniti i u školskoj obuci demonstrirati. Na sl. 4. snimljen je jednostavan oblik Teslina njihala. Na donjem kraju lagane



Sl. 4. — Teslino termomagnetsko njihalo (jednostavna konstrukcija)

U vrijeme ovdje prikazanih istraživanja i tehničkih radova Stefana i Tesle, nastao je problem o proizvodnji električne energije hladnim izgaranjem ugljena. Na tom problemu mnogo su radili Ostwald i drugi kemičari.



Sl. 5. — Nacrt eksperimenta s termomagnetskim kolom

mjedene prečke njihala pričvršćen je tanki željezni jezičac (dug na pr. 2 cm), kojeg magnet zahvaća i pridržava njihalo u kosom položaju. Nakon grijanja magnet otpušta jezičac, a iza 2 do 3 slobodna njihaja, ovaj se toliko ohladi, da ga magnet privuče. Pojav privlačenja i otpuštanja se ponavlja⁹⁾.

Sl. 5. prikazuje nacrt pokusa, koji je analogan pokusu sa Stefanovim kolom. Da žarenje i hlađenje teku što brže, načinjeno je kolo od tanke željezne mreže (promjer 30 cm, širina ~ 2 cm). Kraj jednog mjesta kola postavljen je plinski plamen. Može se postići jedan okret u sekundi⁹⁾.

⁹⁾ Sličan aparat bio je izložen g. 1937. u Palači otkrića u Parizu (didaktički odjel). — U Phil. Mag., vol. 31, № 189 (1891) opisao je S. Bidwell takav eksperiment s bifilarnim njihalom, koje je imalo jezičac od nikalja.

⁹⁾ Na jednom predavanju u Zagrebu, održanom povodom 10-godišnjice Tesline smrti prikazani su među ostalim i ovdje opisana 2 eksperimenta po Tesli i Stefanu. Tesla je umro 7. I. 1943, a 50 godina ranije (7. I. 1893) umro je u Beču Stefan.

Zusammenfassung

ÜBER DIE THERMOMAGNETISCHEN BEWEGUNGSMECHANISMEN
VON J. STEFAN UND N. TESLA

(Kurze Mitteilung aus der Geschichte der Physik und Technik)

D. Pejnović, (Zagreb)

In der vorliegenden Abhandlung wird über die Beiträge von *Stefan* und *Tesla* zum Problem der unmittelbaren Erzeugung der Elektrizität aus der Kohle berichtet.

Stefan hatte schon 1871 in einer theoretischen Abhandlung gezeigt, wie man die durch starkes Erhitzen und Kühlen des Eisens im magnetischen Felde gewonnene mechanische Arbeit benützen kann. Er erkannte auch schlechte Eigenschaften des Eisens, Oxydierung und Inkrustierung durch Erhitzen, und ersetzte in seinen Apparaten Eisen mit Nickel, wobei Demagnetisierung durch Glut schon bei 360° eintritt. Im Winter 1886/7 demonstrierte *Stefan* im Physikalisch-chemischen Verein (Wien) zwei thermomagnetische Apparate: einen Pendel und ein Rad. Beide Apparate waren für Unterrichtszwecke geeignet, aber auf praktische Anwendungsmöglichkeit konnte sich *Stefan* nicht entschliessen. In Fig. 5 ist eine Skizze gezeichnet für einen Schulversuch, der dem Versuche mit dem Apparat von *Stefan* entspricht: 30 cm weites Rad aus Eisennetz dreht sich pro Sekunde einmal.

Auf diesem Gebiete konstruierte auch *Tesla* mehrere Apparate und einen pyromagnetischen Generator der Elektrizität. Bei der einen Anordnung von *Tesla* (Abb. 1) steht der Elektromagnet fest und der Anker ist pendelnd angebracht. In der zweiten Konstruktion (Abb. 2) befindet sich der Anker auf festem Arm, der Hufeisenmagnet mit fest verbundenem Schirm kann sich dagegen hin und herbewegen. Nach der Lage des Schirms wird der Anker mittels freier Flamme periodisch erhitzt, was eine Schwächung oder Aufhebung seines Magnetismus bewirkt. Abb. 4 zeigt eine vereinfachte für den Unterricht geeignete Form des Pendels von *Tesla*.

In der Abb. 3 ist ein thermomagnetischer Generator von *Tesla* gezeichnet. Ein Bündel von Eisenröhren, welches den Anker eines Stahlmagnets bildet, geht durch einen Ofen hindurch. Sobald die Röhren die Erhitzungstemperatur erreichen, wird der bis dahin kurzgeschlossene magnetische Kreis unterbrochen und eine Dampfleitung wird automatisch geöffnet. Der durch die Röhren strömende Dampf kühlt sie ab. Sie werden wieder magnetisch und schliessen wieder den magnetischen Kreis und die Dampfleitung. Ausserhalb des Ofens sind die Eisenröhren von Drahtspulen umgeben, in welchen elektrischer Strom induziert wird.