

# Istraživanja o unipolarnoj indukciji.

Napisao  
Marin Katalinić.

Sa 24 slike.

*Primljeno na sjednici matematičko-prirodoslovnog razreda od 22. svibnja 1941.  
i 13. svibnja 1942.*

Iz fizikalnog zavoda sveučilišta  
u Zagrebu.

## Sadržaj.

- Poglavlje 1.** Povjesni pregled, str. 2—72. — Faraday (1831.), str. 3. Nobili, str. 9. Lenz, str. 15. W. Weber, str. 16. i str. 22. Faraday (1851.), str. 17. Plücker, str. 19. Felici, str. 20. Beer, str. 21. Elementarni i potencijalni zakoni, str. 22. i str. 41. Edlund, Exner i Czermak, Hoppe, str. 25. Preston, str. 27. i str. 39. Silnice kod Faradaya, str. 28. Lecher, str. 39. i str. 41. Raveau, Poincaré, Hoppe, Grotrian, str. 43. W. Wien, Föppl, Lorentz, str. 45. Kennard, Barnett, Fehrle, str. 50. Swann, str. 54. Tate, str. 58. Sklizni kontakti, str. 20., 43. i 60. Prijepor o silnicama u najnovije doba, str. 61. Lorentz, str. 63. i str. 68. Szarvassi, str. 65. Jaumann, str. 66. Magnet kao magnetski prostor, str. 68. Bibliografija, str. 73.
- Poglavlje 2.** Eksperimentalni uređaj, str. 87.
- Poglavlje 3.** Indukcija u ploči na čelu magneta i na njegovom ekvatoru, str. 99.
- Poglavlje 4.** Elektromotorne sile inducirane u magnetu i u vanjskom vodiču, str. 107.
- Poglavlje 5.** Raspodjela elektromotorne sile u procijepu magneta paralelnom sa ravninom ekvatora, str. 116.
- Poglavlje 6.** Elektrostatička mjerenja, str. 120.
- Poglavlje 7.** Blondelov pokus, str. 127.
- Poglavlje 8.** Upliv stranog magnetskog toka na unipolarnu indukciju, str. 135.
- Poglavlje 9.** Zaključak, str. 155. — U pogledu svih do sada poznatih pojava unipolarne indukcije magnet u rotaciji je elektronski vodič, koji rotira kroz svoj vlastiti magnetski tok. Inducirana elektromotorna sila je posljedica djelovanja Lorentzove sile na vodne elektrone u magnetu. Izjednačenje elektromotorne sile inducirane u izoliranoj žici, koja prolazi kroz radijalnu šuplinu u magnetu i vrti se zajedno njim, s elektromotornom silom induciranom u samom magnetu pisac tumači djelovanjem elektromagnetskog vala, koji se kod vrtnje širi u toj šupljini.

**Kazalo imena,** str. 161.

## 1. Povjesni pregled.

Prva istraživanja o skupini pojava, koje danas nazivamo unipolarnom indukcijom, izveo je F a r a d a y koncem godine 1831. u nizu njegovih općih istraživanja o induciranim strujama<sup>1</sup>, koja on u svom Dnevniku označuje kao »Exp(crimen)ts on the production of Electricity from Magnetism«<sup>2</sup>. Ovoj skupini on ne daje nikakva posebnog naziva ni ovdje ni u kasnijim istraživanjima. Pojavi unipolarne indukcije za njega su samo jedan odsječak iz širokog područja indukcijonih pojava, pa on na njih dolazi posve postepenim prelazom iz svojih prvih istraživanja. Najuzi dio ove skupine: trajnu indukciju struje rotacijom magneta oko njegove uzdužne osi nazvao je *unipolarnom indukcijom* istom W. W e b e r<sup>3</sup> nekoliko godina poslije F a r a d a y e v a otkrića, dok je M a t t e u c c i<sup>4</sup> za nju predložio naziv *aksijalna indukcija*. R i e c k e se opravdano usprotivio W e b e r o v u nazivu, pa je predložio nov naziv *magnetelektrički rotacioni pojava*<sup>5</sup>. U svrhu povjesne potpunosti spomenut ćemo i naziv *autopolar na indukcija* (autopolar induction), koji je bez većeg opravdanja predložio J. J. T. C h a b o t i loše ga preveo na njemački sa »Gleichpolinduktion«<sup>5a</sup>. N o e g g e r a t h svoj unipolarni dinamo zove *acikličkim* ili *homopolarnim* dinamom<sup>5b</sup>. N o e g g e r a t h o v naziv »homopolar dynamo« prevođen je na njemački sa »Gleichpolmaschine«. Medjutim tu je došlo

<sup>1</sup> M. Faraday, Experimental Researches in Electricity, vol. I, London 1839; vol. II, London 1844; vol. III, London 1855; facsimile izdanje. Ova skupina pojava obrađena je u jednom dijelu II. niza. — Osim ovog izdanja imao sam pri ruci i njemački prevod od S. Kalischera (Berlin, 1889 do 1891) kao i Poggendorffov prevod I. i II. niza (Ostwald's Klass., Nr. 81). Naprotiv o XXVIII. i XXIX. nizu donio je Poggendorff samo opširne prikaze (Pogg. Ann., Erg.-Bd. III, 535, 542, 1853).

<sup>2</sup> Faraday's Diary, vol. I, London 1932, p. 367, § 1. — Poglavlja iznad § 11322, koja se odnose na XXVIII. niz, nalaze se u V. svesku ovog izdanja (London 1934).

<sup>3</sup> W. Weber, Pogg. Ann. 52, 353, 1841. — Radnja je 2 godine starija, jer je prvi put izašla u Resultate des magn. Vereins, S. 64, 1839. Vidi: G. Wiedemann, Die Lehre v. Galvan. u. Elektromagn., Bd. II/2, II. izd., Braunschweig 1874, str. 37, napomena 1. — Plücker, l. c. 7<sup>3</sup>, S. 372.

<sup>4</sup> C. Matteucci, Cours spécial sur l'induction, le magnétisme de rotation, le diamagnétisme et sur les relations entre la force magnétique et les actions moléculaires; Paris (Mallet-Bachelier) 1854. — Djelo mi nije dostupno. Vidi: Wiedemann, l. c., S. 37. Vidi također: E. P. Le Roux, C. R. 75, 1805, 1872, p. 1806.

<sup>5</sup> E. Riecke, Wied. Ann. 11, 413, 1880, S. 432.

<sup>5a</sup> J. J. T. Chabot, Phil. Mag. (5) 47, 331, 1899.

<sup>5b</sup> Cl. Feldmann, Elektrot. ZS. 26, 831, 1905.



do dvojake dvoznačnosti, jer je ovaj posljednji naziv u Njemačkoj već bio upotrebljen za izvjesnu vrst izmjeničnih generatora, koje je opet Arnold nazivao »unipolare Wechselstrommaschine«<sup>5b</sup>. Noeggerathov naziv »acyclic« imao je značiti dinamo bez komutatora, a »homopolar« dinamo bez premagnetiziranja.

Od starijih pisaca Felici ovu vrst indukcije redovito zove unipolarnom indukcijom, a rijetko upotrebljava Matteuciev naziv<sup>5c</sup>. Samo Budde redovito upotrebljava Matteucciev naziv, ali je njim obuhvatio i stalni dio struje kod Plückerovih pokusa o revoluciji jednog ili više magneta<sup>5d</sup>. Napokon u Celeri-jevoj monografiji<sup>5e</sup> nalazim podatak, da je Pegram<sup>5f</sup> upotrebljavao naziv *aciklička indukcija*; očito je, da je to preuzeo od Noeggeratha. Općenito se je održao samo Weberov naziv, koji je obuhvatio i cijelu širu skupinu pojava, premda taj naziv ne odgovara ni fenomenološki ni pojmovno s bilo kojeg od današnjih gledišta, isto kao što im ne odgovara ni Matteuciev naziv. Valentiner tumači Weberov naziv tim, da se držalo, da u pojavu učestvuje samo jedan magnetski pol, dok se drugi može smatrati bilo koliko udaljenim<sup>6</sup>. Ovakvo tumačenje ne odgovara posve razlogu, s kojega je Weber uveo svoj naziv.

Spomenuta prva Faradayeva istraživanja o unipolarnoj indukciji objelodanjena su u II. nizu njegovih Eksperimentalnih Istraživanja u poglavljima 218 do 230. Otkako je publikacijom njegova Dnevnika ovaj postao pristupačnim širim krugovima, možemo ustanoviti i slijed misli, koji je Faraday o Božiću 1831. doveo do otkrića unipolarne indukcije<sup>7</sup>. Poslije skupine pokusa na bakrenoj ploči medju polovima potkovastog magneta (»F a-

<sup>5c</sup> R. Felici, l. c. <sup>75</sup>, S. 85, 87.

<sup>5d</sup> E. Budde, Wied. Ann. 30, 358, 1887, S. 381.

<sup>5e</sup> F. Celeri, l. c. <sup>95b</sup>, p. 1.

<sup>5f</sup> G. B. Pegram, Phys. Rev. (2) 10, 591, 1917. — Radnja mi nije dostupna, a ne nalazim o njoj ni referata u Ann. Beibl. — Vidi napomenu <sup>210a</sup>.

<sup>6</sup> S. Valentiner, Elektromagn. Induktion (Geiger u. Scheel, Hdb. d. Phys., sv. XV, Berlin 1927, S. 321—380), S. 352. Također od istog pisca: Müller-Pouillet's Lehrb. d. Phys., 11. izd., sv. IV/1, Braunschweig 1932, S. 566, § 7; S. 567.

<sup>7</sup> Rollo Appleyard (The Times, Faraday Nr., 45.933 od 21. IX. 1931, p. VI) naziva Faradayev Dnevnik »the ultimate authority« za pitanja indukcije. To se ne može posve primiti, bar ne za idejna pitanja. U ovom pogledu Dnevnik sadrži prve utiske neposredno iza opažanja, pa ako su ti prvi utisci bili pogrešni, Faraday ih obično ne ispravlja, nego ispravljene zaključke uvodi kao nova poglavlja.

r a d a y e v a ploča»<sup>8</sup>, kojima je razjasnio A r a g o o v rotaciji magnetizam (28. X. i 4. XI. 1831.), a koji su objavljeni u I. nizu Eksperimentalnih Istraživanja, F a r a d a y se na te pokuse vratio 9. XII., te 14. XII. čini »A r a g o's experiment with the Earth magnet only»<sup>9</sup>. On nalazi radijalne struje između središta ploče, koja rotira, i njezine periferije, pa zaključuje: »dakle je A r a g o o v a ploča nov električni stroj»<sup>10</sup>. Ovaj je pokus usavršio 16. XII. izradbom novog aparata, u kome je rotirajuća bakrena ploča imala siguran kontakt na svom rubu<sup>11</sup>. Kad je pod središte te ploče stavio magnetni štap okomito prema ploči, nalazi u njoj jače radijalne struje, kojih smjer kao i prije zavisi o smislu rotacije ploče<sup>12</sup>. Zbog ovog nalaza postavlja on sebi zadatak, da to pobliže istraži<sup>13</sup>. Stroj, koji je namjeravao izgraditi na tom principu, opisao je pobliže u poglavlju 158 u II. nizu Eksperimentalnih Istraživanja.

Odmah bih pripomenuo, da principu tog F a r a d a y e v o g stroja odgovara dvostruki magnet u L e c h e r o v o m pokusu, koji on naziva *experimentum crucis* za pitanje o vrtnji ili mirovanju silnica.<sup>14</sup> Taj je F a r a d a y e v princip oponašan i u starijim pokušajima izgradnje unipolarnih dinama s većim napetostima, kao kod F o r b e s o v a unipolarnog dinama s dvjema pločama i kod S i e m e n s o v a unipolarnog dinama s dvama cilindrima. Varijantom istog principa treba smatrati princip, koji je primjenjen kod spomenutog N o e g g e r a t h o v a dinama <sup>15</sup> (500 volta, 300 kw, 3000 okreta na minut), a napose kod najuspjelijeg od unipolarnih dinama,

<sup>8</sup> Faraday je i u ovom obliku naziva A r a g o o v o m pločom (»A r a g o's plate«; vidi: Diary, § 227). — Njegov naziv: »the revolving disc of A r a g o«, koji dolazi u pismu Gay-Lussacu (Exp. Res., vol. II, p. 179—200) odnosi se i na A r a g o o v pokus u užem smislu (str. 183) i na F a r a d a y e v u izmjenju tog pokusa (str. 184).

<sup>9</sup> Faraday's Diary, § 226. — Vidi: Exp. Res., Ser. II, § 149—154.

<sup>10</sup> Faraday's Diary, § 227: »Hence A r a g o's plate a new Electrical machine«. — Exp. Res., Ser. I, § 83; Ser. II, §§ 154, 158. — Pismo Gay-Lussacu, l. c., str. 182 i 185.

<sup>11</sup> Faraday's Diary, § 228. — Exp. Res., Ser. II, § 155.

<sup>12</sup> Faraday's Diary, § 229; Exp. Res., Ser. II, §§ 156—157. — Pismo Gay-Lussacu, l. c., str. 174, 175.

<sup>13</sup> § 229: »Must consider this more presently«. — § 230: »Probably build a machine up this way«.

<sup>14</sup> E. Lecher, Wien. Ber. 103, 949, 1894, S. 971—977. — Vidi također: Lecher, Wied. Ann. 54, 276, 1895.

<sup>15</sup> Cl. Feldmann, Elektrot. ZS. 26, 831, 1905. Vidi također: F. Tischendorf, ibid. 26, 799, 1905, S. 806—807.



P o i r s o n o v a dinama (14 V, 50000 A, 750 okreta na minut)<sup>15a</sup>. Kod ovih je naime upotrebljen isti smisao rotacije, ali su smjerovi magnetskog toka preokrenuti, mjesto da se preokrenu smisli rotacije susjednih ploča u magnetskom toku istog smjera, kako je to kod F a r a d a y a<sup>15b</sup>.

Iza spomenutih F a r a d a y evih pokusa dolaze 21. i 22. XII. pokusi o strujama induciranim zemaljskim magnetnim poljem u kugli, koja rotira<sup>16</sup>, a već 23. XII. razmišlja F a r a d a y u Dnevniku o tome, kako će izgledati indukcija u magnetu, koji rotira oko svoje uzdužne osi. O tome radi cijelo poglavlje 246, koje ovdje donosim u prevodu. »Ako se magnet brzo vrti, trebale bi u njemu postojati struje elektriciteta u samom željezu, od ekvatora magneta kroz površinu prema krajevima i natrag dolje prema osi. Jedva mogu očekivati, da bih ovo našao pomoću magnetne igle, jer centralna struja djeluje isto tako kao površinska na iglu jednakom silom. Inače bi magnet u vrtnji trebao promijeniti položaj igle nad mirnim magnetom«<sup>17</sup>. U posljednjoj rečenici F a r a d a y misli bez sumnje na analogiju s A r a g o ovim pokusom, dotično na vrtložne struje, koje bi magnetna igla izazvala u magnetu u vrtnji. Međutim nije jasna slika o strujama u magnetu, o kojima govori u prvom stavku, obzirom na riječi »*back down*« i »*central current*«. Riječ *back down* ne smije se lokalizirati na glavu magneta, kao da bi se radilo

<sup>15a</sup> A. C o t t o n, La Nature (Paris), No. 3008, 1937, p. 240—241. — Vidi također: Z o r n, Elektrot. ZS. 59, 146, 1938; 61, 358, 1940. — P o i r s o n o v a radnja u Rev. gén. électr. 44, 605, 1938 nije mi dostupna.

<sup>15b</sup> Srednja ploča P o i r s o n o v a dinama, kroz koju magnetski tok prolazi radijalno, načelno odgovara i radijalno magnetiziranom željeznom kotaču u pokusu, koji je izveo Satyendra R a y. Odgovara mu i po tome, što se najveća elektromotorna sila razvija između osnovnih ploha kotača, dotično srednje ploče dinama, pa se odanle odvodi struja. S ovog gledišta možemo rotor P o i r s o n o v a dinama zamišljati kao radijalno magnetizirani kotač Satyendra R a y ev, kojemu je unutrašnji pol s obiju strana izvučen napolje u smjeru osi. — Satyendra R a y, Phil. Mag. (6) 39, 134, 1920. — Vidi: Phys. Ber. 1, 1197, 1920 i: E. B u d d e, ZS. f. Phys. 3, 287, 1920. — Izvjesna nebitna razlika leži u tome, što kod S. R a y e v a kotača neutralna zona leži u samom kotaču, pa su na njoj, kao na mjestu maksimalne elektromotorne sile, s obiju strana položene doticaljke. Kod P o i r s o n a neutralne zone leže u magnetima, koje zamišljamo obostranim nastavcima unutrašnjeg pola kotača (srednje ploče), a doticaljke su kao i kod R a y a s obje strane te srednje ploče.

<sup>16</sup> F a r a d a y 's Diary, §§ 232—239 a; Exp. Res., Ser. II, §§ 161—170.

<sup>17</sup> F a r a d a y 's Diary, § 246: »If a magnet rapidly rotated, should be currents of electricity in the iron itself, from the equator of magnet near the surface towards the ends and back down the axis. Can hardly expect to find this by mag. needle because central current act(s) as well as superficial and with equal force on needle. Otherwise revolving magnet ought to alter position of needle over quiet magnet«.



o kružnoj struji u magnetu od ekvatora kroz površinu preko pola na os magneta, pa kroz os (central current) i ravninu ekvatora na ekvator. F a r a d a y malo kasnije direktno ističe nemogućnost postojanja takve kružne struje u magnetu, koji se vrti.<sup>18</sup> Ako smjestimo *back down* u ravninu ekvatora, tako da je ekvator razgranište dviju struja — što u krupnim crtama odgovara stanju — takve dvije struje nemaju drugog izlaza u samom magnetu nego istom u mirnom vanjskom krugu, koji dodiruje ekvator i os. Po-teškoća se umanjuje, kad se misli na to, da F a r a d a y često govori o struji, gdje bi bilo mjesta samo za elektromotornu silu, pojam, koji u njegovo doba nije još bio razvijen; jer struju neposredno opaža otklonom galvanometra. Jedina je dakle mogućnost, da F a r a d a y ovdje suponira taj vanjski galvanometarski vod, ali ga izričito ne spominje. Tako i u početku § 150 u II. nizu Istraživanja govori odmah o radijalnim strujama u ploči, koja se vrti u zemaljskom polju, a raspored vanjskog voda spominje iza toga. Na drugim mjestima, gdje govori o električkom stanju u takvoj ploči bez obzira na vanjski vod, govori o *težnji* struja da se stvore u radijalnim smjerovima<sup>19</sup>. U nastavku spomenute misli o magnetu, koji rotira, F a r a d a y u Dnevniku u poglavlju 248 prenosi isti problem i na zemlju, koja rotira u svom magnetnom polju, pa tu govori o »ispražnjivanju« struje (*»can be discharged«*), kad misli na zatvaranje kruga struje. Napokon tu svoju sliku o zemlji potanje obrađuje u poglavlju 182 u II. nizu Eksperimentalnih Istraživanja, pa tu naglašuje potrebu vanjskog voda između pola i ekvatora, da bi mogla nastati struja<sup>20</sup>.

Već odavle se jasno opaža slijed F a r a d a y evih misli, koje su ga dovele do pokusa o unipolarnoj indukciji u magnetu, koji rotira oko svoje uzdužne osi. Vrtložne struje u bakrenoj F a r a d a y evoj ploči, koja rotira među polovima potkovastog magneta, dobivaju sve to više radijalni značaj, što polovi magneta dolaze bliže središtu ploče. Radijalna raspodjela je potpuna u zemaljskom magnetnom polju, a tako isto i u slučaju, kad se magnetni štap na-

<sup>18</sup> Faraday, Exp. Res., Ser. II., §§ 224 i 229.

<sup>19</sup> Faraday, ibid., vol. II, str. 178, napomena 3, uz radnju Nobilia i Antinoria. — Faraday, ibid., vol. II., Letter to M. Gay-Lussac, p. 194—195.

<sup>20</sup> Faraday, ibid., Ser. II., § 182: »But without these conductors, or something equivalent to them, it is evident these currents could not exist, as they could not be discharged«.

lazi okomito pod središtem ploče, koja rotira. Odatle izlazi neposredni zaključak, da će tako biti i u samom magnetu, koji rotira.

Iza ovakvog razvoja misli dolaze u brzom slijedu jedan za drugim pokusi, koji se pribrajaju širem području unipolarne indukcije, premda se danas pod njom ponajviše misli samo pojave u magnetu, koji rotira oko svoje uzdužne osi. Faraday je na te pokuse prešao 26. XII. 1831. Trodnevni razmak od 23. XII., osim Božića, bio mu je svakako potreban, da bi pokuse pripremio. Tako u §§ 255, 256, 257 Dnevnika nalazimo opis pokusa s bakrenom pločom zalijepljenom izolirano na čelu magneta. On u njoj nalazi posve iste pojave kao da ploča rotira sama, a magnet miruje<sup>21</sup>, t. j. galvanometar mu pokazuje istu radijalnu raspodjelu struja, kakvu je našao u prijašnjim pokusima na spomenutom aparatu iz § 228 Dnevnika kod rotacije u zemaljskom polju ili nad magnetnim štapom ispod središta ploče.<sup>22</sup> U §§ 258—261 Dnevnika obrađuje pokuse s bakrenim cilindrom, koji je izolirano (»but not touching the magnet«) navukao preko glave magneta do ekvatora i zajedno s magnetom spustio u živu, koja oblijeva donji kraj cilindra<sup>23</sup>. Istom iza ovih pokusa dolaze pokusi s cilindričkim magnetom, koji rotira oko svoje osi,<sup>24</sup> jer — tako započinje Faraday poglavlje 200 u Eksperimentalnim Istraživanjima — »izgledao je neizbježivim zaključak, da bi kovina samog magneta mogla zamijeniti cilindar, ploču ili žicu u gibanju<sup>25</sup>. Ove riječi izravno ističu gore navedeni slijed misli, a kao dalju potvrdu za to Faraday nastavlja svoje pokuse toga dana na daljim istraživanjima o indukciji zemaljskim magnetizmom u ploči, koja rotira<sup>26</sup>. — Sigurno zbog potrebnih tehničkih priprema, posljednji pokus o unipolarnoj indukciji, onaj s djelomično prošupljenim magnetom, koji je bio zamislio već 23. XII. neposredno iza glavnog pokusa s magnetom<sup>27</sup>, došao je na red istom 26. I. 1932<sup>28</sup>.

<sup>21</sup> Faraday, *ibid.*, Ser. II, § 218.

<sup>22</sup> Faraday's Diary, §§ 228—229; Exp. Res., §§ 155—157. Najbolje tumačenje ovih pokusa daje Faraday u pismu Gay-Lussacu, l. c., p. 185 i 194—195. Vidi dalje napomene <sup>45</sup> i <sup>47</sup>.

<sup>23</sup> Faraday, Exp. Res., Ser. II, § 219.

<sup>24</sup> Faraday's Diary, §§ 262—270; Exp. Res., Ser. II, §§ 220—224.

<sup>25</sup> Faraday, Exp. Res., Ser. II, § 220: »That the metal of the magnet itself might be substituted for the moving cylinder, disc, or wire, seemed an inevitable consequence«.

<sup>26</sup> Faraday's Diary, §§ 271—273.

<sup>27</sup> *Ibid.*, § 247: »If rotate hollow cylinder magnet perhaps expect something«. — To je cijelo poglavlje.



Gore navedeni slijed misli iznio je F a r a d a y u Eksperimentalnim Istraživanjima u poglavlju 217, koje treba smatrati uvodom u pokuse o unipolarnoj indukciji, i to u vrlo zbijenom obliku. On tu navodi kao cilj ovih pokusa ispitivanje, da li je samo gibanje uz presjecanje krivulja *jednakog* magnetskog intenziteta dovoljno za postanak struje<sup>29</sup>, pa kao priloge za opravdanost tog svog nazora on samo nabraja gore spomenute pokuse onim redom, kojim dolaze u Eksperimentalnim Istraživanjima. Čini mi se, da je ovaj oblik mogao biti razlogom, da unutrašnja povezanost navedenih pokusa, koja je od bitne važnosti za shvaćanje unipolarne indukcije, nije bila zapažena, premda su oni nabrojeni u poglavlju 217, a ovo poglavlje sa poglavljima 218 do 220 čini cjelinu. Tome je svakako mogla doprinijeti i okolnost, što su pokusi iz §§ 228—229 Dnevnika u Eksperimentalnim Istraživanjima dosta daleko ispred pokusa o unipolarnoj indukciji, jer ovdje dolaze već u poglavljima 155—157. Medjutim s navedenim slijedom misli stoji u skladu uži cilj, koji F a r a d a y daje svom pokusu o rotirajućem cilindričkom magnetu u prije navedenom početku poglavlja 220<sup>30</sup>. Zaključak pak, koji on izvodi iz tog pokusa s magnetom, glasi: »Tako je učinjena očevidnom jedna *osobita nezavisnost* magnetizma o štapu, u kome se on nalazi«<sup>31</sup>. Taj zaključak dakle daje potpuni odgovor na postavljeno pitanje, t. j.: magnet, koji rotira, identičan je s gledišta indukcije s pločom ili cilindrom, koji su namješteni na glavi magneta, pa rotiraju zajedno s njim. Gdje sam god našao citirane ove F a r a d a y eve riječi bilo u cjelini bilo u odlomku (»a singular independence«), to je dolazilo u vezi s pitanjem, da li silnice rotiraju s magnetom ili one miruju, dok magnet rotira. Medjutim iz svega izlazi, da takvo citiranje znači sužavanje značenja, koji su one imale za F a r a d a y a. Njihov pravi smisao i dubina misli, koja je u njima sadržana, izlaze samo onda, kad ih se dovede u dosljednu vezu s gore navedenim razvojem misli, kakav nalazimo u Dnevniku i u poglavlju 217, te u početku poglavlja 220 Eksperimentalnih Istra-

<sup>29</sup> F a r a d a y, Exp. Res., Ser. II, § 217: »or whether, always intersecting curves of equal magnetic intensity, the mere motion was sufficient for the production of the current«. Vidi istu misao u § 245 Dnevnika, koji treba isto tako smatrati uvodom spomenutom razmišljanju o magnetu u vrtnji (§ 246).

<sup>30</sup> Vidi napomenu 25.

<sup>31</sup> F a r a d a y, Exp. Res., Ser. II, § 220: »Thus a *singular independence* of the magnetism and the bar in which it resides is rendered evident«. — Kurziv je i u originalu.

živanja. Da je F a r a d a y i dalje ustrajao u ovakvom shvaćanju, pokazuje ono mjesto u njegovoj radnji iz g. 1851, gdje on kaže, da se u nekim slučajevima stvar da tako shvatiti, da se magnet vrti među svojim silnicama<sup>32</sup>, a struju tim induciranu naziva jednostavno »the induced magnetelectric current« (§ 3177).

Prema ovakvom stanju stvari unipolarna indukcija u F a r a d a y evim očima izlazi neposredno iz njegovih istraživanja na A r a g o ovoj ploči. Bakrena ploča, koja rotira nad polom magneta, koji se nalazi pod njezinom osi rotacije, ili koja rotira u zemaljskom magnetnom polju, samo su specijalni slučajevi A r a g o ove ploče. Bakrena ploča ili bakreni cilindar na glavi magneta iz poglavlja 218 i 219 Eksperimentalnih Istraživanja daju iste rezultate kao bakrena ploča, koja u istim prilikama rotira bez magneta. Napokon, sam cilindrički magnet, koji rotira oko svoje uzdužne osi, ujedinjuje u sebi i bakrenu ploču i silnice, koje su uzrok indukcije. Danas bismo rekli: on je elektronski vodič, koji rotira aksijalno simetrično u svom unutrašnjem magnetnom toku. Na sve te slučajeve proteže se zajednička im karakteristika, da »struje teže da se stvore ili zaista postoje u pravcu polumjera u cijeloj ploči.<sup>33</sup> Napose takva radijalna raspodjela nastupa onda, »kad magnetske silnice, koje reže ploča, koja rotira, imaju jednaku jakost i prolaze kroz sve dijelove ploče u istom smjeru, kako to biva, kad se zemaljski magnetizam upotrebljava kao uzbuđujući uzrok«. <sup>34</sup> F a r a d a y doduše nije direktno ustanovio radijalne raspodjele struja na glavi magneta; ali je takvu raspodjelu na glavi magneta, koji se vrti, odmah iduće godine našao N o b i l i <sup>35</sup>.

Radi se o posljednjoj iz niza N o b i l i evih radnja iz područja induciranih struja, a ujedno o jedinoj od njih, koju je N o b i l i napisao bez suradnje A n t i n o r i a <sup>36</sup>. O unipolarnoj indukciji s

<sup>32</sup> Vidi napomenu 152.

<sup>33</sup> Ovo mjesto, kao i ono u idućoj napomeni, nalaze se u primjedbama F a r a d a y evim na radnju N o b i l i a i A n t i n o r i a, Exp. Res., vol. II, str. 178, napomena 3: »The case of the currents tending to be formed, or really existing in the direction of the radii throughout the whole plate«. Kurziv je u originalu.

<sup>34</sup> F a r a d a y, ibid.: »or when the magnetic curves intersected by the revolving plate are of equal strength, and pass through all parts of the plate in the same direction, as happens when the earth's magnetism is used as the exciting cause«. — Vidi također napomene 22 i 47.

<sup>35</sup> Vidi napomenu 40.

<sup>36</sup> L. N o b i l i, Antologia di Firenze, No. 142, 1832. — Radnja je izašla u prevodu u Pogg. Ann. 27, 401, 1833; ovaj mi prevod nije dostupan, jer



ovog šireg gledišta rade u njoj tri poglavlja<sup>37</sup>. Osim toga, što N o b i l i iznosi vrijedne podatke, koji dopunjuju pregled cijelog pojava, te djelomično idu dalje od F a r a d a y evih, radnja je važna i zato, što se konačno N o b i l i e v o gledište u ovom predmetu poklapa s F a r a d a y evim, premda im putevi nijesu isti. On radi najprije s okruglim bakrenim pločama, koje rotiraju, pa istražuje raspored struja induciranih u njima, kad im u ekvatorijalnoj ravnini primakne žicu, kroz koju teče struja, paralelno s osi ili okomito na os. Odatle nalazi neposredan prelaz na slučaj, gdje takva ploča ili kugla rotiraju u niskoj uzvojnici, kroz koju teče struja. Osim radijalne raspodjele («induzione raggianti»)<sup>37a</sup> na bazi ploče, on nalazi na pobočju nešto debljih ploča<sup>38</sup> i na kugli, čija se os vrtnje podudara s osi uzvojnice, istu raspodjelu kao na pobočju cilindričkog magneta, koji rotira. »Treba takodjer promisliti, da se elektrodinamska indukcija zbiva u svim smjerovima, pa ako ima radijalnih struja na površini mase, mora ih biti i u unutrašnjosti».<sup>39</sup> »Sada je vrijeme da postavimo jedno drugo pitanje, to jest da pitamo, što bi bilo, kad bi mase u gibanju sadržavale u sebi uzrok, koji proizvodi indukciju, t. j. one električne struje, koje se prije činilo djelovati izvana njih. Da odgovorimo na takvo pitanje, koje služi kao prirodan prelaz k lijepim rezultatima magneta u vrtnji g. F a r a d a y a, ...».<sup>39a</sup> »Magnetni štap ili cilindar, koji rotira oko svoje osi,

sveučilišna knjižnica ne posjeduje ovog sveska anala. — Napokon je radnja ponovno izašla u N o b i l i e v i m sabranim djelima: L. N o b i l i, *Memorie ed osservazioni edite ed inedite*, vol. I—II, Firenze (Pasigli), 1834; vol. I., p. 255—279. Naš franjevac fra Stanko Bušelić, sada u Rimu, imao je rijetko strpljenje, pa je ovu opsežnu radnju za mene točno i doslovno prepisao i slike precrtao iz N o b i l i e v e knjige prema primjerku u R. Biblioteca nazionale centrale u Rimu. Prepis je izveden tako, da se po njemu mogu pozivati na strane originala. O. fra Stanku Bušeliću od srca zahvaljujem na toj njegovoj velikoj pomoći i na ovom mjestu. — Popis N o b i l i e v i h radnja o induciranim strujama dao je V. V o l t e r r a, *Nature* 128, 342, 1931, p. 345. — W i e d e m a n n, l. c. 3, str. 187—190 donosi opširan prikaz ovih N o b i l i e v i h pokusa.

<sup>37</sup> Po redu u radnji šesto, sedmo i deveto. Njihovi su naslovi: *Dischi e globi ruotanti* (p. 262—264); *Riflessioni sulla natura dell'induzione raggianti* (p. 264—266); *Calamite ruotanti* (p. 267—270).

<sup>37a</sup> »Radiale Induktion« kod B u d d e a (l. c. 5d, S. 382) znači nešto posve drugoga. Vidi takodjer: B u d d e, *ZS. f. Phys.* 3, 287, 1920.

<sup>38</sup> Debljina 6 linija.

<sup>39</sup> N o b i l i, l. c., p. 265: »bisogna anche riflettere, che l' induzione elettrodinamica ha luogo in tutte le direzioni, e però se vi sono delle correnti raggianti alla superficie delle masse, ve ne sono necessariamente anche nell'interno«.

<sup>39a</sup> N o b i l i, l. c., p. 268: »Ora è tempo di proporre un' altra questione, di chiedere cioè, che cosa accadrebbe, se le masse in movimento contenessero in

izvodi na sebi istu vrst indukcije, koja je ustanovljena i opisana na ploči, na koju izvana djeluje elektrodinamska uzvojnica. Ona ploča bila je široka i niska; naprotiv magnetski cilindar je uzak promjerom, a visok u drugom smjeru. ... pošto učinak točno odgovara onome, kakav pripada jednakom bakrenom cilindru  $sn$ , omotanom posvuda naokolo jednom elektrodinamskom uzvojnicom, uzbuđenom na taj način, da u  $n$  i  $s$  proizvodi iste polove, koje pokazuje obični magnet<sup>40</sup>. Međutim za ploče, koje rotiraju u gore opisanim prilikama, N o b i l i zaključuje, da »radijalne struje stvarno ne postoje, nego da postoji mjesto njih električna napetost<sup>41</sup>, a tako isto: »izgleda, da nijesu stvarno električne struje ono, što se razvija u magnetima, koji rotiraju, nego izgleda, da su to električne napetosti<sup>42</sup>, koje su upravljene radijalno<sup>43</sup>. N o b i l i izvodi isti zaključak kao F a r a d a y, pa doslovce citira i navedeni završetak F a r a d a y eva poglavlja 220. Kod toga je sporedno, što on F a r a d a y evu »singular independence« magnetizma o magnetu tumači u smislu A m p è r e ove teorije magnetizma, t. j. da su radijalne inducirane struje, dotično napetosti, nezavisne o A m p è r e ovim molekularnim strujama.<sup>43a</sup>

sè la causa induttrice, vale a dire quelle correnti elettriche che prima si facevano agire fuori di esse». »Per rispondere a un tale quesito che serve di transizione naturale ai bei risultati delle calamite ruotanti del sig. F a r a d a y, ...«.

<sup>40</sup> N o b i l i, l. c., p. 269: »Una barra, un cilindro calamitato, che giri intorno al proprio asse, rinnova sopra di sè quel medesimo genere d'induzione, che si verificò e descrisse sul disco  $\infty$  influenzato al di fuori da una spirale elettro-dinamica. Quel disco era largo e basso: un cilindro calamitato è all'opposto ristretto di diametro ed alto nell' altro senso. .... corrispondendo l'effetto precisamente a quello, che spetta ad un uguale cilindro di rame  $sn$ , avvolto tutt' all' intorno da una spirale elettro-dinamica, eccitata in modo da produrre in  $n$ ,  $s$  quegli stessi poli che presenta la calamita ordinaria«. — Na ovaj tekst se odnosi u radnji sl. 51, koja na lijevo donosi cilindrički magnetni štap s raspodjelom napetosti na pobočju i s *radijalnom raspodjelom* na glavi magneta; u desnoj polovini slike pak donosi cilindrički bakreni štap iste veličine, omotan uzvojnicom.

<sup>41</sup> N o b i l i, ibid., p. 265: »Da quest' analisi pare se ne possano dedurre queste due conseguenze, l' una che le correnti raggianti non esistono realmente sui metalli in movimento, ma che esiste in loro vece la tensione elettrica; ...«.

<sup>42</sup> N o b i l i, ibid., p. 270: »perché non sembrano realmente correnti elettriche quelle che si sviluppano dentro alle calamite ruotanti; sembrano tensioni elettriche ...«.

<sup>43</sup> N o b i l i, ibid., p. 271: »eccitamento che non può imprimere all' ago magnetico alcun movimento, se l' elettricità si trova su que' raggi in istato di tensione e non già di corrente ...«.

<sup>43a</sup> Ove N o b i l i e v e eksperimentalne rezultate treba ujedno smatrati ispravkom pogrešnog nalaza u starijoj radnji od N o b i l i a i A n t i n o r i a (Antologia di Firenze. No. 134, 1832; Pogg. Ann. 24, 621, 1832, S. 623), gdje uz



Prema tome Nobiliu pripada prednost, da je izričito naglasio, da se prvobitno induciraju električne napetosti. I Faraday suponira radijalnu raspodjelu napetosti, ali se ne izražava tako jasno kao Nobili. Treba misliti na to, da Faraday na prvom mjestu ustanovljuje ono, što mu pokazuje galvanometar. Gdje on misli na ono, što se zbiva u magnetu ili u ploči, bez obzira na to, da li je vanjski (galvanometarski) spoj uklopljen ili nije, on se služi terminologijom sličnom onoj, kojom je opisao elektrotoničko stanje kao sposobnost ili težnju kovine, da u njoj nastane struja.<sup>44</sup> Na tim mjestima on govori o težnji struje, da se stvori ili da teče<sup>45</sup>. Gdje govori o radijalnim *strujama*, to je uvijek u vezi s galvanometrom<sup>46</sup>. Naprotiv u pismu Gay-Lussacu on naročito naglašuje, da u ploči, koja rotira pred polom magneta u aksijalno simetričnom položaju, ne nastaju struje<sup>47</sup>. Tako treba razumjeti i prije spomenuto mjesto u napomenama na radnju Nobilia i Antinoria, gdje govori o radijalnim strujama ili o težnji, da se takve struje stvore<sup>48</sup>. Takav način izražavanja zadržao je Faraday još i 20 godina kasnije.<sup>49</sup> Zanimivo je, da se tim načinom izražavanja poslužio i Maxwell kod svog prikaza Faradayeve elektrotoničkog stanja,<sup>50</sup> a upotrebio ga je i nedavno u jednom popularnom članku Sir William Bragg<sup>51</sup>. Prema tome, kod Faradaya i

centralni položaj magneta prema bakrenoj ploči, koji odgovara Faradaye-  
vom pokusu iz § 229 Dnevnika, njihove ispitne žice (scandagli) nijesu u gal-  
vanometru pokazivale nikakvih struja »wohin man sie auch stellt«.

<sup>44</sup> Faraday, Exp. Res., Ser. I, § 60: »the power of originating a current«.

<sup>45</sup> Faraday, ibid., vol. II, Letter to M. Gay-Lussac, p. 185: »the electric currents tend as strongly to be produced«; ibid., p. 194: »the tendency to the formation of electric currents«; i t. d.

<sup>46</sup> Vidi n. pr.: Exp. Res., Ser. II, §§ 150, 152, 155, 156, 219, i t. d.

<sup>47</sup> Faraday, ibid., vol. II, Letter to M. Gay-Lussac, p. 194: »we substitute a circular disc revolving on its axis, and then consider the case of the magnetic pole placed over its centre, there will then be no electric currents to be formed«. Zatim nekoliko redaka dalje: »As no current can exist...«, nema ni djelovanja na magnet. (Kurziv je u originalu). To isto dolazi i u jednoj radnji iz g. 1854., gdje ponovno spominje sličan pokus (Exp. Res., vol. III, § 3339).

<sup>48</sup> Vidi napomenu 33.

<sup>49</sup> Faraday's Diary, § 11333: »currents tending to form«; § 11404: »tend to have currents«. — Exp. Res., vol. III, Ser. XXVIII, § 3109: »tendency of currents to form«; slično i u § 3087: »has, or tends to have a current of electricity produced in it«.

<sup>50</sup> J. C. Maxwell, On Faraday's Lines of Force (Ostwald's Klass., Nr. 69, S. 46).

<sup>51</sup> Sir W. Bragg, The Times, l. c. 7, p. VIII.

kod *Nobilia* drukčiji su načini izražavanja, ali je konačni rezultat isti: u magnetu, koji rotira oko svoje osi, u ploči ili u kugli, koje rotiraju u magnetnom polju aksijalno simetričnom prema osi rotacije, stvara se zbog vrtnje u magnetnom polju radijalna raspodjela napetosti. Mi bismo danas to izmijenili u toliko, da bismo umjesto napetosti govorili o elektromotornoj sili. Usljed toga i po jednom i po drugom stvara se zbog vrtnje u magnetnom polju pozitivan ili negativan elektricitet na ekvatoru, već prema smislu vrtnje.

Radijalna raspodjela napetosti uz dijeljenje od ekvatora ili k ekvatoru je karakteristika unipolarne indukcije na pravilno magnetiziranom magnetu, na odebljoj ploči ili na kugli, koje su namještene simetrično u uzvojnici. Medjutim dijeljenje od ekvatora ili k njemu sekundaran je pojav, a posljedica je u jednom i u drugom slučaju rasipanja magnetskog toka izvan ravnine ekvatora. Pomaknemo li ploču ili cilindar, koji rotiraju u uzvojnici, više prema kraju uzvojnice pomiče se i ravnina dijeljenja prema strani, gdje je homogenost veća<sup>52</sup>. Prilike u ravnini ekvatora pravilno magnetiziranog magneta odgovaraju prilikama na ploči ili cilindru, koji rotiraju u posve homogenom magnetnom toku koaksijalno s njegovim smjerom, naravno u koliko se magnetni tok u ravnini ekvatora magneta može uzeti homogenim. Na ploči u takvim prilikama nema dijeljenja u ekvatoru, jer su svi presjeci s ekvatorom ekvivalentni. Tako je n. pr. na *F a r a d a y e*voj ploči, koja rotira u zemaljskom magnetnom polju oko osi položene u magnetnom meridijanu u smjeru inklinacije ili u ma kojem drugom smjeru. —

Teško je ustanoviti, zašto se poslije *F a r a d a y a* i *N o b i l i a* skoro posve izgubilo ovakvo gledanje na unipolarnu indukciju. Činjenica je, da se od *W. W e b e r a* dalje i u eksperimentalnom istraživanju i u teoriji unipolarne indukcije ograničila na indukciju rotacijom cilindričkog magneta oko njegove uzdužne osi. *P l ü c k e r*<sup>53</sup> je amo pribrojio i indukciju ekscentričnom rotacijom jednog ili više magneta (obrat *F a r a d a y e*va rotacijonog pokusa), gdje ipak više djeluje tranzlacija. *B e e r* je indukciju u pločama, koje rotiraju na osi magneta zajedno s njim, nazvao »Induction von Strömen in Körpern«<sup>54</sup>, pa možda odatle dolazi i sličan naziv, pod

<sup>52</sup> Vidi prikaz *Nobilievih* istraživanja kod *Wiedemann*, l. c., str. 188 i sl. 326.

<sup>53</sup> *J. Plücker*, l. c. 73.

<sup>54</sup> *A. Beer*, l. c. 76, S. 187.



kojim je W i e d e m a n n obuhvatio N o b i l i e v e pokuse i struje u F a r a d a y e v o j ploči.<sup>55</sup> Ovaj W i e d e m a n n o v naziv upotrebio je i H i m s t e d t za jednu skupinu svojih istraživanja<sup>56</sup>. L e R o u x je struje inducirane u bakrenim pločama, koje je vrtio u polju među polovima jakog elektromagneta aksijalno simetrično prema polju, nazvao peripolarnom indukcijom (induction péripolaire).<sup>57</sup> Radi se pak samo o ponavljanju i varijantama osnovnog F a r a d a y e v a pokusa iz poglavlja 229. Dnevnika, dotično iz poglavlja 156. Eksperimentalnih Istraživanja, s tom razlikom, da su kod L e R o u x a svi pokusi izvedeni jačim sredstvima i u većem opsegu. Najvažniji L e R o u x o v pokus: da bakrena ploča, koja rotira u opisanim prilikama, ne pokazuje elektromagnetskog kočenja ni u najjačim aksijalno simetričnim poljima, izravna je posljedica F a r a d a y e v a nalaza, da u tom slučaju ne mogu u ploči postojati radialne struje<sup>58</sup>. — Još i u posljednje vrijeme indukciju u kovnoj ploči, koja rotira u homogenom magnetnom polju, O l l i v i e r obradjuje odijeljeno od unipolarne indukcije.<sup>58a</sup>

Naprotiv su rijetki pisci (n. pr. E d l u n d), koji pod pojmom unipolarne indukcije obuhvaćaju cijelo široko područje pojava, koje joj pripada po F a r a d a y u i po N o b i l i u. Takvu široku definiciju nalazimo istom početkom našeg vijeka kod L o r e n t z a<sup>59</sup>. Naprotiv A b r a h a m daje tako usku definiciju, da ona formalno ne obuhvaća ni slučaja, gdje meko željezo rotira u uzvojnici, koja ga magnetizira<sup>60</sup>. Poslije L o r e n t z a nalazimo češće i u eksperimentalnim i u teoretskim radnjama, da se problem unipolarne indukcije ne ograničuje samo na rotirajući magnet. Osim B a r n e t t a i F e h r l e a, o kojima će kasnije biti govora, i kod kojih je u vezi s W i l s o n o v i m pokusom širem shvaćanju doprinijela i L o r e n t z -

<sup>55</sup> G. Wiedemann, l. c. 3, S. 187: »Induction in körperlichen Leitern«.

<sup>56</sup> F. Himstedt, Wied. Ann. 11, 812, 1880.

<sup>57</sup> F. P. Le Roux, C. R. 75, 1805, 1872.

<sup>58</sup> Vidi napomenu <sup>47</sup>.

<sup>58a</sup> H. Ollivier, Cours de phys. générale, t. I, Paris 1927, p. 400.

<sup>59</sup> H. A. Lorentz, Encyklop. d. math. Wiss. V/2, 13, § 18, S. 100: »Dieser Körper, den man sich permanent, temporär, oder auch nicht, magnetisiert denken kann, rotiere um OZ mit der konstanten Winkelgeschwindigkeit«. Glavno je, da se tijelo nalazi u magnetskom polju simetričnom oko rotacijone osi OZ.

<sup>60</sup> M. Abraham u. A. Föppl, Theorie d. Elektrizität, Bd. I, 4. izd. (Leipzig-Berlin 1912.), S. 395; 7. izd. (Leipzig-Berlin 1923.), S. 375: »Als unipolare Induktion bezeichnet man das Auftreten induzierter elektrischer Kräfte infolge der Drehung eines zylindrischen permanenten Magneten um seine Achse«.

ova elektronska teorija kovina, spomenut ćemo još Grottriana<sup>61</sup> i Diesselhorsta<sup>62</sup>. Diesselhorst je sa širokog Lórentzova gledišta obradio i unipolarnu rotaciju (Ampèreeov pokus) kao Barlowljevo kolo. — Kennardova definicija svakako je preširoka<sup>62a</sup>.

Dvije godine poslije Faradaya ponovio je Lenz pokus o unipolarnoj indukciji rotacijom magneta uporedo s Ampèreeovim rotacionim pokusom<sup>63</sup>. On dolazi do zaključka, da su oba pokusa međusobno recipročna, dotično, da struja inducirana u magnetu, koji se vrti, odgovara općem pravilu o smjeru inducirane struje, koje danas nazivamo Lenzovim imenom. Ova je recipročnost izmedju unipolarne indukcije i Ampèreeova rotacionog pokusa od onda općenito poprmljena kao primjer općeg principa recipročnosti u elektrodinamici. Diesselhorst je dokazao, da je ona posljedica zakona o održanju energije<sup>62</sup>. — Nešto prije Lenz a tvrdio je i Ritchie, da postoji recipročnost općenito izmedju rotacionih pokusa i struja induciranih rotacijom, pa tako da postoji takva recipročnost i izmedju unipolarne indukcije i Ampèreeova pokusa. Ali on je induciranoj struji davao isti predznak kao struji, koja izvodi rotaciju<sup>63a</sup>. Poggenдорff je u napomeni na kraju radnje odmah upozorio na mogućnost pogreške u pogledu smjera obiju struja.

Medjutim treba istaknuti, da recipročnost izmedju ovih dvaju pojava vrijedi i razumljiva je samo onda, ako se na Ampèreeov pokus primijeni onakvo gledište, koje su u novije doba iznijeli i obrazložili Diesselhorst,<sup>62</sup> te Zeleny i Page.<sup>64</sup> Po tom gledištu Ampèreeov rotirajući magnet je Barlowljevo kolo za svoj unutarnji magnetski tok. Posljednja dva pisca su dokazala, da ta recipročnost jednako vrijedi i za bakreni cilindar, koji rotira u uzvojnici,<sup>65</sup> a to je obrat Nobilievog pokusa. Kod starijeg

<sup>61</sup> O. Grottrian, Ann. d. Phys. (4) 10, 270, 1903.

<sup>62</sup> H. Diesselhorst, Elektrodynamik (Graetz, Handb. d. Elektr. u. d. Magnetismus, Bd. IV, Leipzig 1920.), S. 1323—1326.

<sup>62a</sup> E. H. Kennard, Phil. Mag. (6) 33, 179, 1917, p. 179: »Unipolar induction in the general sense may be defined as induction due to motion alone«.

<sup>63</sup> E. Lenz, Pogg. Ann. 31, 483, 1834, S. 493—494.

<sup>63a</sup> W. Ritchie, Pogg. Ann. 31, 203, 1834, S. 205. Original: Phil. Mag. (3) 4, 1834.

<sup>64</sup> J. Zeleny a. L. Page, Phys. Rev. (2) 24, 544, 1924; 27, 470, 1926; 40, 299, 1932.

<sup>65</sup> J. Zeleny a. L. Page, Phys. Rev. 24, 544, 1924, p. 556—557.



Grottrianova unipolarnog motora bez željeza<sup>66</sup> smisao vrtnje ne zavisi o polaritetu, jer se s promjenom polariteta uzvojnice mijenja i smjer struje u ekvatorijalnom cilindru.

Spomenuta Weberova radnja<sup>67</sup> iz g. 1839., dotično 1841., prva je veća radnja o unipolarnoj indukciji poslije Faradayevih i Nobilievih istraživanja. Weber obradjuje teorijski i eksperimentalno najuži slučaj unipolarne indukcije, t. j. indukciju na magnetu, koji rotira, jer on misli, da se odatle može izvesti odluka između teorije dvaju fluida i Ampèreove teorije molekularnih struja. Svoje rezultate tumači u prilog teoriji dvaju fluida<sup>68</sup>. On zamišlja, da kod indukcije na magnetu, koji se vrti, već u elementarnim magnetima djeluje samo jedan magnetički fluid, pa zato ovu indukciju naziva unipolarnom<sup>69</sup>, za razliku od drugih slučajeva magnetoindukcije, gdje po njegovom mišljenju djeluju oba magnetička fluida magneta kao cjeline. Po njegovim nazorima unipolarna indukcija nastaje u predjelima oko polova magneta. Osim jedne novotarije, koju on uvodi na osnovu toga nazora, a na koju ćemo se obazreti u jednom kasnijem poglavlju, Weberova radnja ne donosi bitno novih rezultata. Važna je zbog toga, jer je njegova aparatura — kojoj se u ostalom može naći izvor u jednoj Faradayevoj varijanti<sup>70</sup> — postala uzorom cijelom nizu kasnijih aparata za unipolarnu indukciju. — Mnogo godina kasnije Riecke je revidirao Weberove zaključke, pa je našao, da pojavi unipolarne indukcije ne mogu dati eksperimentalne odluke između teorije fluida i Ampèreove teorije<sup>71</sup>.

Istom nakon više od jednog decenija poslije ove Weberove radnje javljaju se najprije dvije nove eksperimentalne radnje o unipolarnoj indukciji, i to Faradayeva radnja iz g. 1851.<sup>72</sup> i Plückerova radnja<sup>73</sup>, a onda su istraživanja učestala. Dolaze istraživanja Matteucieva, čija mi knjiga<sup>74</sup> nije dostupna, i

<sup>66</sup> O. Grottrian, l. c. <sup>61</sup>.

<sup>67</sup> W. Weber, l. c. <sup>3</sup>.

<sup>68</sup> W. Weber, *ibid.*, S. 379—380.

<sup>69</sup> W. Weber, *ibid.*, S. 356: »Diese Induction eines Stroms durch die Bewegung eines magnetischen Fluidums heisse eine *unipolare* Induction«. — Vidi i njegovu sl. 4 na tabli V, te njezin opis na str. 360.

<sup>70</sup> Faraday, *Exp. Res.*, Ser. II, § 223.

<sup>71</sup> E. Riecke, *Wied. Ann.* 11, 413, 1880, S. 431.

<sup>72</sup> M. Faraday, *Exp. Res.*, vol. III., Ser. XXVIII.

<sup>73</sup> J. Plücker, *Pogg. Ann.* 87, 352, 1852.

<sup>74</sup> C. Matteucci, l. c. <sup>4</sup>.

istraživanja Felicieva.<sup>75</sup> Godine 1855. došla je teoretska radnja od Beera<sup>76</sup>, od koje se može datirati početak dugih kontroverzija teoretske prirode o unipolarnoj indukciji. — U razdoblju od g. 1840. do 1850. odnosi se na unipolarnu indukciju samo jedna kratka bilješka u jednoj Fechnerovoj radnji.<sup>76a</sup>

Naslov spomenute Faradayeve radnje glasi: »O magnet-skim silnicama, njihovoj odredjenosti i njihovoj raspodjeli u magnetu i u prostoru«. <sup>77</sup> Unipolarnom indukcijom u najužem smislu, t. j. indukcijom izazvanom vrtnjom magneta oko uzdužne osi, bavi se samo manji dio radnje (poglavlja 3084 i 3085, te 3090 do 3122). Navedeni naslov i ova druga okolnost bit će razlozi, zbog kojih se ova Faradayeva radnja dosta rijetko spominje u literaturi o unipolarnoj indukciji. Od starijih pisaca spominju je, pa je i dosta citiraju, samo Preston i Lecher. A ipak je ova radnja vrlo važna, jer je Faraday u njoj utvrdio osnovna načela, koja moraju služiti kao podloga svakom istraživanju o unipolarnoj indukciji.

U skladu s naslovom radnje unipolarna indukcija ovdje nije Faradayu cilj nego mu je ona jedno od sredstava za istraživanje magnetskih silnica, napose da ustanovi »raspodjelu ovih silnica izvan magneta i unutar samog magneta, o kojemu su zavisne ili kome pripadaju«. <sup>78</sup> Tako on označuje u poglavlju 3084 ove radnje svrhu svog aparata za okretanje magneta. Svrha ovog aparata prvobitno je naznačena u Dnevniku nešto drukčije, jer su tu Faradayu bili bliži neposredni rezultati pokusa, pa je zato i indukcija neposredno istaknuta. Tamo nalazimo: »Jedan aparat za pokuse o okretanju žica oko magneta obzirom na stanje silnica oko jednog magneta i bitne uslove potrebne za razvitak električnih struja«. <sup>79</sup> Radnja je važna i zato, jer je Faraday ovdje uveo elektrodi-

<sup>75</sup> R. Felici, *Ann. delle Univ. Toscane* 3/2, 99—136, 1854; 4/2, 5—23, 1855. — Njemački prevod: *Ostwald's Klass.*, Nr. 109, str. 40 i str. 87. Citiram po ovom prevodu.

<sup>76</sup> A. Beer, *Pogg. Ann.* 94, 177, 1855.

<sup>76a</sup> G. Th. Fechner, *Pogg. Ann.* 64, 337, 1845, S. 343—344, Fussn. 1.

<sup>77</sup> Faraday, l. c. <sup>72</sup>: »On lines of Magnetic Force; their definite character; and their distribution within a Magnet and through space«.

<sup>78</sup> Faraday, *ibid.*, § 3084: »and also for the purpose of ascertaining how these lines of force are disposed, both without and within the magnet itself, upon which they are dependent or to which they belong«.

<sup>79</sup> Faraday's *Diary*, § 11322: »An apparatus for expts. on the revolutions of wires about magnets in reference to the condition of the lines of force about a magnet, and the essential conditions requisite for the evolution of Electric currents«.



namsku definiciju silnice, iz koje se definicije vidi, da je njegova »line of force« u stvari indukcijona linija. Cijelo njegovo istraživanje u nizovima XXVIII. i XXIX. počiva na toj definiciji, a prema završnom poglavlju (3176) prve radnje svrha mu je upravo da dokaže, da je istraživanje magnetskog polja pomoću indukcije jedini ispravan postupak. Inače se metoda magnetskih mjerenja pomoću indukcije redovito pripisuje Weberu.

Pokusi iz ove radnje, koji pripadaju području unipolarne indukcije, izvedeni su početkom drugog polugodišta g. 1851. Najveći dio njih zabilježeni su u Dnevniku od poglavlja 11322 redom do poglavlja 11421 (dne 14., 16., 18., 24., 25.VII. i 5. VIII. 1851.). Da bi revidirao pojedine važnije rezultate, Faraday je izgradio poseban galvanometar malenog otpora, a veće osjetljivosti,<sup>80</sup> pa je glavni pokuse ponovio pomoću njega<sup>81</sup> u poglavljima 11583 do 11597 (4. X.), te u poglavljima 11640 do 11642 (8. X.) i u poglavlju 11653 (10. X. 1851.).

Okolnost, da je unipolarna indukcija ovdje Faradayu sredstvo, a ne svrha, ne može opravdati spomenutog zanemarivanja ove njegove radnje. Sve pokazuje, da je njegova aparatura sazidana na starom iskustvu iz g. 1831., pa se ovi novi pokusi izravno nastavljaju na poglavljima 220 i 223 u II. nizu Eksperimentalnih Istraživanja. U poglavlju 11346 Dnevnika kaže sam Faraday za svoj pokus s upotrebljenim dvostrukim magnetom u poglavljima 11342 i 11343, da je taj pokus identičan s njegovim starim pokusom s rotirajućim magnetom iz g. 1831.<sup>82</sup> Na taj se stari pokus poziva i u poglavlju 3118 iste radnje. Kod toga mu nije smetalo, što je ovdje magnet u stvari sastojao od dvaju magneta pričvršćenih paralelno u rotacijskom aparatu u malenom razmaku ( $\frac{1}{15}$  palca) jedan od drugoga. Nije mu smetalo ni to, što je kod prve skupine ovih pokusa radijalna žica zajedno s aksijalnom žicom bila izolirana od magneta, dok je kod starih pokusa sam magnet zamjenjivao obje žice. — Napokon u poglavlju 3119 iste radnje nastavio je Faraday na glavi svog dvostrukog magneta ploču od bakra ili od

<sup>80</sup> Faraday, *ibid.*, §§ 11525—11526; *Exp. Res.*, vol. III, Ser. XXVIII, § 3123; Ser. XXIX, §§ 3178—3180.

<sup>81</sup> Faraday's *Diary*, § 11583: »using the thick wire galvanometer and thick copper wire communications«.

<sup>82</sup> Faraday, *ibid.*, § 11346: »The last experiment is the same as my old one of spinning a magnet and obtaining the current by holding wires from the galvanometer against the axial and equatorial parts«.

srebra, pa su mu pokusi s takvim uređajem identični sa starim pokusima iz poglavlja 218. i 219. u II. nizu, jer se na ova dva poglavlja poziva navodeći po svom običaju njihove brojeve u zagradi.

Kod svih ovih pokusa galvanometar je bio spojen između osi rotacijonog aparata i vanjske žice, koja je ili činila cjelinu s unutrašnjom žicom, koja se provlačila između obaju magneta, ili je bila spojena skliznim kontaktom s bakrenim prstenom u ekvatoru magneta. Osnovni pokus Faradayev bio je ovaj: ako su magnet i vanjska žica rotirali istodobno istom kutnom brzinom, galvanometar nije pokazivao otklona. Faraday tumači ovaj negativni rezultat tim, što se u vanjskoj žici i u magnetu — dotično u unutrašnjoj žici, koja ga zamjenjuje — pobuđuju točno jednake suprotne struje,<sup>83</sup> pa odatle zaključuje, da su broj i jakost silnica unutar magneta točno isti kao izvan magneta. Ovaj svoj osnovni pokus Faraday je publicirao i u prikazu svog predavanja održanog pred *Royal Institution*<sup>84</sup>, a sadržaj tog prikaza je u stvari kratak pregled XXVIII. niza i dijelova XXIX. niza. Ova je publikacija onda došla u ruke Plückeru, koji je spomenuti osnovni pokus odmah shvatio kao unipolarnu indukciju, pa njegov opis doslovno citira na engleskom.<sup>85</sup> To je jedan dokaz više gornjoj tvrdnji, da nije bilo opravdano, što je ova Faradayeve radnja u kasnijoj literaturi o unipolarnoj indukciji dobrim dijelom pala u zaborav. Smatram potrebnim istaknuti ovu okolnost, jer mi se čini, da je točnije poznavanje ove radnje moglo pomoći, da se izbjegnu neke pogreške i lutanja, koja se ovdje-ondje nalaze u kasnijoj literaturi (n. pr. Exner i Czermak, Abraham i Föppl).

Plücker je u eksperimentalnom dijelu svoje radnje ispitivao recipročnost elektromagnetskih rotacija i magnetoelektrične indukcije rotacijom. Pošto je on te pokuse prema njegovoj izjavi izveo dvije godine prije publikacije radnje<sup>86</sup>, ova se ima smatrati

<sup>83</sup> Faraday, *ibid.*, § 11585: »Reverse currents were given for the magnet and for the wire when they were revolved in the same direction«. — *Exp. Res.*, vol. III, p. 404: »contrary currents of electricity, exactly equal to each other, tended to be produced«. — Kurziv je u originalu.

<sup>84</sup> Faraday, *Roy. Inst. Proc.* 23. I. 1852. (*Exp. Res.*, vol. III, p. 402—406, On the Lines of Magnetic Force).

<sup>85</sup> Plücker, l. c. 73, str. 352 i str. 371, napomena 1. — Ne tako Pogendorff, koji u svom prikazu XXVIII. niza (*Pogg. Ann.*, Erg.-Bd. III, 535, 1853) glavnu važnost posvećuje silnicama, a unipolarne indukcije ni ne spominje.

<sup>86</sup> Plücker, l. c. 73, str. 352.



nezavisnom o navedenim F a r a d a y evim istraživanjima iz g. 1851. O unipolarnoj indukciji rade njegovi pokusi opisani pod br. 14 (str. 356), br. 24 (str. 361—363), br. 43 (str. 375—376). To su u glavnom ponavljanja i varijante F a r a d a y evih pokusa s rotirajućim magnetom iz g. 1831. i ne donose ništa nova. Ostali njegovi pokusi bave se indukcijom izazvanom revolucijom jednog, dvaju, ili više magneta oko osi ekscentrične prema osi magneta. Takvu revoluciju možemo rastaviti u paralelnu translaciju i rotaciju magneta, pa se kod nje da lako ustanoviti, da se kod nje struja inducira većim dijelom translacijom magneta kroz galvanometarski krug zatvoren pomičnim dijelom kroz os rotacije. Prema tome se stvar ovim komplicira, kako to i P l ü c k e r opaža za revoluciju dvaju ekscentričnih magneta<sup>87</sup>. To se vidi odatle, što se kod revolucije *jednog* ekscentričnog magneta inducira očividno valovita struja. Kod ponavljanja ovog pokusa poznatim P o h l o v i m aparatom<sup>87a</sup> za F a r a d a y ev rotacioni pokus, u kome sam namjestio samo jedan magnet, dobio sam kod okretanja aparata za cca. 170° slijedeće otklone. Okret za 170° izveden tako, da magnet prolazi kroz galvanometarski krug, dao je 15,4 dijelova otklona, a jednaki okret na suprotnoj strani, tako da je magnet uvijek izvan galvanometarskog kruga, dao je samo 9,6 dijelova.

Felici na kraju svoje druge rasprave o elektrodinamskoj indukciji diskutira unipolarnu indukciju na magnetu u vrtnji, pa pokazuje, da se ona ne da protumačiti relativnim gibanjem između magneta i galvanometarskog kruga<sup>88</sup>. Najveći dio njegove treće rasprave posvećen je unipolarnoj indukciji<sup>89</sup>. On uvodi hipotezu posebne elektromotorne sile, koja bi imala nastajati u skliznim kontaktima u magnetnom polju (»na dodirnim točkama dvaju vodiča, koji se skližu jedan po drugome u prisutnosti jednog magneta«), a okomito je uperena na plošni elemenat sklizne plohe<sup>90</sup>. U trećoj raspravi najprije je eksperimentalno istražio slučaj indukcije na

<sup>87</sup> P l ü c k e r, *ibid.*, br. 26, str. 363—364. — G. W i e d e m a n n, l. c. 3, str. 37, posmatra unipolarnu indukciju kao specijalan slučaj P l ü c k e r o v i h pokusa. — Isto i W ü l l n e r, *Lehrb. d. Experim.-Physik*, Bd. III, 5. izd., Leipzig 1897., S. 1178.

<sup>87a</sup> Nije jasno, ima li se ovaj aparat, obzirom na prednost, nazivati imenom G. F. P o h l a ili imenom S t u r g e o n a. Ovaj drugi ga je opisao u *Phil. Mag.* 64, 246, 1825. Vidi: *Pogg. Ann.* 24, 632, 1832, str. 633 i sl. 8.

<sup>88</sup> Felici, l. c. 75, §§ 51—54 (*Ostwald's Klass.* Nr. 109, S. 79—86).

<sup>89</sup> Felici, *ibid.*, §§ 55—74 (*Ostw. Klass.*, *ibid.*, S. 87—111).

<sup>90</sup> Felici, *Ostw. Klass.*, *ibid.*, S. 85.

magnetu u vrtnji, zatim slučaj koaksijalne ploče, namještene nešto iznad glave magneta, pa je ovdje našao važnih podataka, na koje ćemo se osvrnuti u jednom kasnijem poglavlju. Promatrajući ove rezultate s gledišta spomenute hipoteze, on ih u matematičkom dijelu uzima kao osnovu, na kojoj izvodi svoju opću jednadžbu indukcije<sup>91</sup>. — Možda bi se dala smatrati zaostatkom ove bitne uloge, koju sklizni kontakti imaju kod Felicia, velika uloga, koju im kasnije daje Helmholtz,<sup>92</sup> pa i u novije vrijeme Poincaré kod elektromagnetskih rotacija<sup>93</sup>. Čini se, da im još i u posljednje vrijeme Valentiner pripisuje neku posebnu ulogu kod unipolarne indukcije<sup>94</sup>. Ipak imam dojam, kao da on tu miješa sklizne kontakte (»Gleitstellen«) sa Szarvassievim skliznim ploham (»Gleitfläche«)<sup>94</sup>. O skliznim kontaktima govori i Maxwell, ali im ne pripisuje nikakve posebne teoretske uloge<sup>95</sup>. Bitna uloga, koju im pripisuje Föppl<sup>95a</sup> za unipolarnu indukciju, dolazi odatle, što on pojav posmatra s gledišta hipoteze, da se silnice vrte s magnetom. Napokon je u najnovije vrijeme Celeri<sup>95b</sup> veći dio svoje monografije o unipolarnoj indukciji posvetio proučavanju krugova, koji rotacijom obuhvaćaju magnetski tok, a sadrže dva sklizna kontakta. — Medjutim je već Zöllner eksperimentalnim putem uspješno pobijao protiv Helmholtza bitnost uloge skliznih kontakta za unipolarnu indukciju i za unipolarne rotacije.<sup>96</sup>

Beer u svojoj spomenutoj radnji primjenjuje unipolarnu indukciju na to, da ispita, kojemu od elementarnih zakona, Laplace-Biotovu ili Ampèreovu pripada prednost. Tim su

<sup>91</sup> Felici, *ibid.*, S. 95—96.

<sup>92</sup> H. v. Helmholtz, *Wissensch. Abh.*, Bd. I., S. 697—700, 706—707, 736—742. Po njemu je sklizni kontakt »Gleitung eines Leiterstückes längs der Oberfläche des anderen«, pa se on trudi da dokaže, da je na tim mjestima promjena brzine neprekidna, da bi se na krugove sa skliznim kontaktima mogao primijeniti Neumannov potencijalni zakon. Cf. *ibid.* S. 739.

<sup>93</sup> H. Poincaré, *L'éclair. électr.* 23, 41, 1900 (*Ann. Beibl.* 24, 1013, 1900); *La science & l'hypothèse*, Paris 1908., p. 265—267. — Vidi o Poincaréu takodjer: G. R. Olshausen, *Ann. d. Phys.* (4) 6, 681, 1901, S. 724.

<sup>94</sup> S. Valentiner, l. c. 6, na prvom mjestu, S. 351. Usporedi takodjer str. 353 s napomenom 2 na str. 354. Kod Valentinera su sklizni kontakti karakterizirani skokom brzine, što je karakteristika i za skliznu plohu.

<sup>95</sup> J. C. Maxwell, *Electr. a. Magnetism.*, 3. izd., Oxford 1904., vol. II, § 491.

<sup>95a</sup> A. Föppl, *Einf. in d. Maxwellsche Theorie d. Elektrizität*, Leipzig 1894, S. 328.

<sup>95b</sup> F. Celeri, *Sul meccanismo dei contatti striscianti nei sistemi per induzione e rotazione unipolare*, Padova 1939. (postumno izdanje).

<sup>96</sup> F. Zöllner, *Pogg. Ann.* 160, 604, 1877.



sporem onda obuhvaćeni s jedne strane Plückerovi nazori, s druge strane Neumannovi. Primjena prvog zakona donosi sa sobom, da je sjedište inducirane elektromotorne sile u samom magnetu, koji rotira, jer tu nastaje indukcija, a ne u nepomičnom dijelu kruga. Prema tome na magnetu, koji rotira izolirano, mora se elektricitet jednog predznaka pojaviti na ekvatoru, a elektricitet suprotnog predznaka na polovima. Taj se zaključak podudara sa starijim zaključcima Faradaya, Nobilia i Plückera, do kojeg su prva dvojica došla posve drugim putem. Primjenom Ampèreovih i Neumannovih nazora pak izlazi, da se indukcija zbiva u nepomičnom dijelu galvanometarskog kruga. Prema tome magnet u vrtnji neće imati na sebi naboja; ali će se suprotni naboji pojaviti na kraju vodiča, koji primaknemo njegovoj osovini i ekvatoru<sup>96a</sup>. Potrebno je s druge strane spomenuti, da Helmholtz nalazi u pogledu unipolarne indukcije odlučnu opreku i između Ampèrea i Neumanna. Kovna ploča, koja rotira u magnetnom polju paralelnom i aksijalno simetričnom prema rotacijonoj osi, imala bi po Ampèreovu zakonu dobiti električni naboj na rubu, a po Neumannu ne<sup>97</sup>.

Prijepor o elementarnim zakonima, koji je započeo Beer, ocrtao se je i u diskusiji o unipolarnoj indukciji, koja je nastala deset godina kasnije između C. Neumanna i W. Webera s jedne strane, a Edlunda s druge strane. Neumann je u nastavku svoje radnje o Weberovu zakonu<sup>98</sup> obratio pažnju na unipolarnu indukciju s gledišta pitanja unitarne ili dualističke predodžbe o elektricitetu, pa je došao do zaključka, da se unipolarna indukcija solenoidom, koji rotira, ne da dovesti u sklad s unitarnom teorijom, nego samo s dualističkom. Edlund<sup>98a</sup> sa stano- višta unitarne teorije uvodi za potkrepu svojih nazora eksperimentalno gledište. Uredjaj njegova pokusa, koji je varijanta jednog Plückerova pokusa<sup>98b</sup>, sastoji se od širokog šupljeg bakrenog

<sup>96a</sup> Beer, l. c., S. 187, 191—192.

<sup>97</sup> Helmholtz, l. c., Bd. I, S. 762.

<sup>98</sup> C. Neumann, Pogg. Ann. 155, 211, 1875.

<sup>98a</sup> E. Edlund, Pogg. Ann. 156, 590, 1875.

<sup>98b</sup> Plücker, l. c. <sup>73</sup>, pokus br. 22 na str. 360—361 i njegove varijante na slijedećim stranama. Edlund se na taj pokus poziva, pa ga diskutira zajedno sa svojim pokusom. — Varijantom ovog Plückerova pokusa, pa i Edlundova pokusa, treba smatrati aparat, koji opisuje Sutton u svojoj knjizi pod E-218, premda je na oko izvedba posve druga (Sutton, Demonstration Experiments in Physics, New York—London 1938., p. 340—341).

valjka, u osi kojega je namješten cilindrički magnet. Mogu rotirati ili sam valjak ili valjak zajedno s magnetom. Galvanometar je spojen između ekvatora valjka i njegova donjeg ruba. Prema tome pokus je u stvari varijanta starog Faradayeva pokusa s bakrenim valjkom na glavi magneta, samo s tom razlikom, da je kod Faradaya valjak bio učvršćen na glavi magneta, pa je rotirao zajedno s njim. — U ovu diskusiju zašao je i Weber<sup>99</sup>, pa je zanimljiv način, kako on tumači eksperimentalnu činjenicu, da u Plückerovu i u Edlundovu pokusu galvanometar ne pokazuje struje, ako samo magnet rotira, dok valjak (vodič  $b'$ ) i galvanometarski vod (vodič  $b''$ ) miruju. Po njemu je svejedno, da li magnet miruje, a vanjski vodič rotira, ili vanjski vodič miruje, a magnet rotira obrnutim smjerom. Magnet u vrtnji bi u mirnom vodiču  $b'$  inducirao struju istog smjera i iste jakosti, kao što je magnet inducira u mirnom vodiču  $b''$  svojom vrtnjom obrnutog smjera. Prema tome, ako magnet rotira izvjesnim smjerom, on inducira u  $b'$  i u  $b''$  struje iste jakosti, ali obrnutog smjera, pa galvanometar, koji je uklopljen između  $b'$  i  $b''$ , ne pokazuje struje. Ovakvo tumačenje čini se u prvi mah nevjerojatnim i kad se na stvar gleda sa stanovišta hipoteze o rotaciji silnica s magnetom. Međutim se po svemu vidi, da Weber zamišlja smjer inducirane elektromotorne sile u granama vodiča  $b'b''$  po smjeru struje u jednom dijelu cijeloga vodiča, specijalno u galvanometru. S druge strane radi se o primjeni Weberova zakona, kako se to vidi iz iduće radnje C. Neumanna<sup>100</sup>. Ova je također odgovor na Edlundovu radnju, kao i na njegovu drugu<sup>101</sup>, kojom je on odgovorio na Weberove prigovore. I Neumann stoji na stanovištu, da magnet u vrtnji općenito uzimajući inducira elektromotornu silu u vodičima u svojoj okolini. Za slučaj Plückerova pokusa on dokazuje stavak, da se u vodiču  $b'b''$  inducira struja, koja je proporcijonalna razlici kutnih brzina dijelova  $b'$  i  $b''$ , ali je nezavisna o kutnoj brzini rotacije magneta. Prema tome, za slučaj, kad magnet rotira, a valjak  $b'$  i galvanometarski vod  $b''$  miruju, imamo opet rezultat nula kao kod Webera.

Iste je godine Edlundov pokus diskutirao Wand<sup>102</sup> s gledišta Helmholtzova potencijalnog zakona u jednoj radnji, u

<sup>99</sup> W. Weber, Pogg. Ann. 157, 146, 1876.

<sup>100</sup> C. Neumann, Pogg. Ann. 159, 301, 1876.

<sup>101</sup> E. Edlund, Pogg. Ann. 157, 630, 1876.

<sup>102</sup> Th. Wand, Pogg. Ann. 159, 94, 1876, S. 115—117.



kojoj on dokazuje, da Weberov zakon treba napustiti. I kod njega sama rotacija magneta inducira elektromotornu silu u vanjskom vodiču, pa se u slučaju zatvorenog vodiča  $b'b''$  inducira u oba dijela *ista* elektromotorna sila. Tako pak nije, ako magnet i valjak  $b'$  rotiraju istom kutnom brzinom ili ako rotira samo valjak. U prvom se slučaju inducira elektromotorna sila samo u  $b''$ , u drugom samo u  $b'$ ; ali smjer i jakost struje u galvanometru su isti, jer je u drugom slučaju vrtnja samog valjka ekvivalentna vrtnji magneta suprotnom kutnom brzinom.

E d l u n d (l. c. <sup>101</sup>) prema Weberu ne zalazi u teoretsku diskusiju; on samo ističe eksperimentalne činjenice, da se u Plückerovu pokusu dobiva inducirana struja, ako valjak rotira sam ili s magnetom, a nikada je nema, ako sam magnet rotira. Prema Neumannu on brani teoretskim putem primjenu unitarne teorije na unipolarnu indukciju.<sup>102a</sup>

Prijepori o unipolarnoj indukciji obzirom na primjenu jednog ili drugog elementarnog ili potencijalnog zakona nastavili su se i dalje, pa su djelomično zahvatili i prve godine našeg vijeka. Unipolarna indukcija zajedno s Plückerovim proširenjem na jedan ili više ekscentrično namještenih magneta, kao i rotacijoni pokusi, koji su se razvili iz Faradayevih rotacijonih pokusa, postali su prijepornim područjem, u kojem su se tražile prednosti jednog ili drugog takvog zakona prema ostalima. Od starijih amo pripadaju radnje od Rieckea<sup>103</sup>, Lorberga<sup>103a</sup>, Kocha<sup>103b</sup>, Buddea,<sup>103c</sup> a od novijih: od Königa,<sup>104</sup> Hagenbacha<sup>104a</sup> i Olshausena<sup>104b</sup>. Lorberg je našao opreke slične onima kod Beera također između zakona indukcije od Webera, od Rieckea i od Clausiusa<sup>103d</sup>.

Dok su ovo najvećim dijelom teoretska istraživanja, u eksperimentalnim radnjama odrazio se je posve drugi pravac. Kad su Faradayeve silnice počele dobivati sve veću važnost, javio se je novi

<sup>102a</sup> E. Edlund, Pogg. Ann. 160, 617, 1877.

<sup>103</sup> E. Riecke, Wied. Ann. 1, 110, 1877; 11, 413, 1880; 25, 496, 1885.

<sup>103a</sup> H. Lorberg, Pogg. Ann., Erg.-Bd. VIII, 581, 1878; *ibid.*, 599, 1878; Wied. Ann. 36, 671, 1887.

<sup>103b</sup> F. Koch, Wied. Ann. 19, 143, 1880.

<sup>103c</sup> E. Budde, Wied. Ann. 30, 100, 1887, S. 135—156.

<sup>103d</sup> Lorberg, l. c. <sup>103a</sup>, S. 586—587, 592, 596.

<sup>104</sup> W. König, Wied. Ann. 60, 519, 1897; Ann. d. Phys. (4) 2, 854, 1900.

<sup>104a</sup> E. Hagenbach, Ann. d. Phys. (4) 4, 233, 1901.

<sup>104b</sup> G. R. Olshausen, Ann. d. Phys. (4) 6, 681, 1901.

prijepor, da li se kod unipolarne indukcije cilindričkim magnetom, koji se vrti, vrte s njim i njegove silnice, ili silnice miruju, a magnet se vrti kroz njih. Konačni rezultati obiju hipoteza slični su onima kod prijepora o elementarnim i potencijalnim zakonima. U slučaju, da se silnice vrte, na magnetu nema slobodnog naboja, a elektromotorna se sila inducira u nepomičnom dijelu galvanometarskog kruga. U drugom slučaju inducira se elektromotorna sila u magnetu, pa ovaj dobiva na ekvatoru i oko osi suprotne slobodne naboje, kako su to tvrdili Faraday, Nobili i Plücker. Zbog ove sličnosti rezultata vjerojatno je, da je — barem na evropskom kontinentu — ovom novom prijeporu dao podstreka i stari prijepor o zakonima.

I ovom novom prijeporu dala su djelomično povoda novija istraživanja Edlunda o unipolarnoj indukciji,<sup>105</sup> u kojoj je on kušao naći porijeklo atmosferskom elektricitetu<sup>105a</sup>. On je dakle u tome nastavio ondje, gdje su bili stali Faraday i Plücker. Edlund je postavio novu teoriju o unipolarnoj indukciji, kojom nastoji zaći dublje u bit pojava, a izveo ju je, kao i samu indukciju, iz mehaničke teorije topline. Ona je važna i s povjesnog gledišta, jer se njezini osnovni nazori mogu smatrati pretečom elektronske teorije struje kroz kovine. Ako n. pr. bakreni valjak u njegovom pokusu rotira koaksijalno oko cilindričkog magneta, »tada će električni molekuli, koji se nalaze u kovnom plaštu, biti ponešeni u smjeru rotacije i oni čine horizontalne kružne struje oko magneta«.<sup>106</sup> Na elemente ovih konvektivnih struja djeluju polovi magneta reakcijom silom Biot-Savartova zakona, pa dolazi do stvaranja naboja u sredini ili na krajevima plašta, već prema smislu vrtnje<sup>106a</sup>. Dakle će galvanometar pokazivati struju, ako ga

<sup>105</sup> E. Edlund, Wied. Ann. 2, 347, 1877. — Vetensk. Akad. Handl. (Stockholm) 16, 1878; prevod: Phil. Mag. (5) 6, 289, 360, 423, 1878; Ann. Beibl. 2, 661—666, 1878 (autoreferat). — Bihang Vetensk. Akad. Handl. (Stockholm) 5, 1879; Ann. Beibl. 3, 755—757, 1879 (autoreferat). — Bih. Vetensk. Akad. Handl. (Stockholm) 21, 1885. — Vetensk. Akad. Handl. (Stockholm) 22, 1887 (Ann. Beibl. 11, 793, 1887); prevod Phil. Mag. (5) 24, 401, 1887. — Originali ovih radnja u publikacijama švedske akademije nijesu mi dostupni. — Nadalje: E. Edlund, Wiener Ber. 95, 97, 1887. — Wied. Ann. 29, 420, 1886; 30, 655, 1887.

<sup>105a</sup> Edlund, Phil. Mag. (5) 6, 360, 423, 1878.

<sup>106</sup> Edlund, Ann. Beibl. 2, 661, 1878, S. 662. Vidi također: Phil. Mag. (5) 6, 289, 1878, p. 292. — Edlund se i ovdje drži unitarne teorije, ali ističe, da se na stvari ništa ne mijenja, hoće li se uzeti dvije vrste električnih molekula ili samo jedna.

<sup>106a</sup> Vidi i njegovo razmatranje o pokusu s pločom, koja rotira ispred magnetskog pola, u Phil. Mag. (5) 6, 289, 1878, p. 295.



spojimo između kraja i sredine plašta. Pojav je nezavisan o tome, da li kod toga i magnet rotira ili on miruje, dok valjak rotira. Dakle je osnovna pretpostavka E d l u n d ove teorije, da magnetske silnice ne sudjeluju u vrtnji, dok električki molekuli potpuno sudjeluju.

L o r b e r g je E d l u n d ovim računima u radnji iz g. 1887. predbacio netemeljitost (»höchst ungründlich«)<sup>106b</sup>. Medjutim je naročito važno, što se kod E d l u n d a polazna točka, s koje on gleda na unipolarnu indukciju, podudara sa spomenutim načinom, kako su na nju gledali F a r a d a y i N o b i l i, a kasnije L o r e n t z. »Sam magnet tada obavlja uloge vodiča, i indukcija ne dolazi odatle, što je on stavljen u vrtnju kao magnet, nego od njegove vrtnje kao vrtnje vodiča«<sup>106c</sup> (razumije se dakako: vodiča pod magnetskim djelovanjem).

Protiv ove E d l u n d ove teorije javili su se nekako istodobno s jedne strane E x n e r i C z e r m a k, s druge strane H o p p e eksperimentalnim radnjama, u kojima pisci hoće da dokažu, da silnice rotiraju s magnetom. E x n e r i C z e r m a k<sup>107</sup> izvede dokaz, da silnice rotiraju, na taj način, što oni puštaju, da mjeraci instrumenat u vanjskom vodiču rotira zajedno s magnetom i s vanjskim vodičem. Taj instrumenat je srebrni kulometar sa srebrnim elektrodama. Pa kako ovaj poslije vrtnje ne pokazuje polarizacije, oni zaključuju, da je to zato, što silnice rotiraju. Jer kad silnice ne bi rotirale — tako oni razlažu — nastala bi u vanjskom vodiču elektromotorna sila, koja bi bila kratko spojena kroz magnet, pa bi morala teći struja, koja bi izazvala polarizaciju u kulometru. Piscima očito nije bio poznat F a r a d a y ev osnovni pokus iz g. 1851. i njegovo tumačenje tog pokusa, prema kojemu uz pretpostavku mirovanja silnica nastaju u vanjskom vodiču i magnetu jednake elektromotorne sile, koje u krugu sastavljenom od vanjskog vodiča i magneta djeluju nasuprotno, pa opet nema struje<sup>108</sup>. Prema tome je njihov pokus ništetan. E d l u n d<sup>109</sup> je u svojoj primjedbi na njihovu radnju taj isti protudokaz izveo na osnovu svoje teorije.

<sup>106b</sup> H. Lorberg, Wied. Ann. 36, 671, 1889, S. 672.

<sup>106c</sup> E. Edlund, Phil. Mag. (5) 6, 289, 1878, p. 291: »The magnet itself then performs the functions of a conductor, and the induction does not result from its being put in rotation as a magnet, but from its rotation as a conductor«.

<sup>107</sup> F. Exner u. P. Czermak, Wiener Ber. 94, 357, 1886.

<sup>108</sup> Vidi citate iz Dnevnika i iz Eksp. Istraživanja u napomeni <sup>83</sup>.

<sup>109</sup> Edlund, Wiener Ber. 95, 97, 1887.

H o p p e se je protiv E d l u n d ovih nazora, a u prilog hipotezi o rotaciji silnica, javio dvjema eksperimentalnim radnjama<sup>110</sup>. U njima na osnovu negativnih rezultata svojih galvanometričkih i elektrometričkih mjerenja, dobivenih na dosta nepreglednoj aparaturi, dokazuje, da silnice rotiraju s magnetom. On se poziva i na B u d d e a, čiji teoretski rezultati takodjer govore protiv E d l u n d ove teorije<sup>110a</sup>. U diskusiji, koja je slijedila<sup>110b</sup>, E d l u n d pobija H o p p e a, pa dolazi do zaključka, da H o p p e ovi pokusi ne samo ne pobijaju njegove teorije, nego naprotiv govore za nju. U stvari H o p p e ovi negativni rezultati ne govore ništa. Naročito to vrijedi za njegova elektrometrička mjerenja, jer su njegovi elektrometri bili premalo osjetljivi. To se vidi, kad se uzme u obzir malena frekvencija vrtnje i slabi magneti (šuplji), s kakvima je on radio, pa se ovo uspoređi s prilikama kod kasnijih G r o t r i a n ovih elektrometričkih mjerenja<sup>111</sup>. — Svoje konačne poglede u ovom sporu iznio je E d l u n d u radnji iz g. 1887.,<sup>111a</sup> u kojoj matematičkim putem pobija hipotezu o rotaciji silnica.

Na drugoj strani i s drugog gledišta, a posve nezavisno o E d l u n d ovoj teoriji i o prijedoru o elementarnim zakonima — bar tako se čini — javio se je nešto prije u prilog hipotezi o rotaciji silnica F a r a d a y ev zemljak S. P r e s t o n<sup>112</sup> kritikom F a r a d a y eve pretpostavke, da silnice miruju, dok magnet rotira. Vrlo često njega smatraju začetnikom hipoteze o rotaciji silnica s magnetom. On napose pobija F a r a d a y evo razlikovanje između translacije i rotacije magnetu.<sup>113</sup> Za njega je rotacija »translation in a circle«, jer se svaki dio magnetu prenosi u krugu. Ako dakle silnice sudjeluju u gibanju kod translacije, mora se to isto pretpostaviti i za rotaciju. Iz svega on donosi zaključak, da silnice rotiraju s magnetom. — Pripomenuti je, da P r e s t o n ova radnja donosi samo kritiku nazora F a r a d a y evih i P l ü c k e r ovih, a u drugom svom dijelu i W e b e r ovih nazora, sve sa gledišta hipoteze o rotaciji silnica.

<sup>110</sup> Edm. Hoppe, Wied. Ann. 28, 478, 1886; 29, 544, 1886.

<sup>110a</sup> E. Buddé, l. c. <sup>103c</sup>, S. 141, Fussn. 1.

<sup>110b</sup> Edlund, Wied. Ann. 29, 420, 1886. — Hoppe, ibid., 29, 544, 1886, S. 556 ff. — Edlund, ibid., 30, 655, 1887. — Hoppe, ibid., 32, 297, 1887.

<sup>111</sup> O. Grottrian, l. c. 163.

<sup>111a</sup> Edlund, Phil. Mag. (5) 24, 401, 1887.

<sup>112</sup> S. T. Preston, Phil. Mag. (5) 19, 131, 215, 1885.

<sup>113</sup> To se pobijanje odnosi upravo na mjesto iz § 3090 u XXVIII. nizu, koje donosim kasnije. Vidi napomenu <sup>152</sup>.



Po svemu se čini, da on nije izveo nijedan od pokusa, koje diskutira ili predlaže.

I Preston izvodi mnoge svoje prigovore i svoje zaključke iz načela relativnosti gibanja kod indukcije. »When, for example, a piece of wire *ab* is placed near a revolving solenoid or simple circular current, <sup>ss</sup>, it is quite indifferent, as regards the inductive effect, whether the circular current revolves about its centre (or axis), or whether, conversely, the wire *ab* is made to revolve about the fixed circular current, in the direction of the dotted line, so long as the *relative* motion between the two is the same. I only suppose that in reference to inductive effects with currents we have to do with *relative*, and not with *absolute* motions«<sup>114</sup>. Žica *ab* je radijalna žica izvan uzvojnice; *dotted line* je krug koncentričan s uzvojnicom. — Na isto izlazi i Prestonovo rješenje problema o okruglom magnetu i koncentričnoj kovnoj sfernoj ljusci, koja ga opkoljuje, u pogledu tendencije stvaranja inducirane struje u ljusci (»strive to generate«). U pogledu *zatvorenog* kruga indukcija *struje* u jednom i u drugom Prestonovu primjeru stoji u suprotnosti s Faradayevim zaključkom, da u vanjskom zatvorenom krugu ne može nastati struja<sup>114a</sup>. Prvi je primjer u suprotnosti i s negativnim rezultatom Faradayeve pokusa, gdje je ploča pred čelom magneta mirovala, a magnet je rotirao.<sup>114b</sup> Što se pak tiče otvorenih krugova kod mjerenja elektrometrom, na što i Preston misli u nastavku svoje diskusije o okruglom magnetu i ljusci, njegov problem o indukciji u ljusci, ako samo magnet rotira, uskrsnuo je skoro 30 godina kasnije u sličnom obliku, a djelomično i s gledišta relativnosti gibanja, u pokusima Kennarda, Barnetta i Fehrllea i u prijetoru glede njihova tumačenja, a javio se opet u nastavku kod Swanna. Napokon eksperimentalni uređaj u Prestonovoj zamisli u pogledu električnog naboja na ljusci oko magneta u načelu je identičan s uređajem kod Swanna i kod Lawrencea. Samo je rješenje pitanja u pogledu sjedišta primarno inducirane struje, kad magnet rotira, a ljuska miruje, drukčije kod ovih pisaca nego u Prestonovoj zamisli.

Kod ovoga se opaža, da su obje strane u protuslovlju i u pogledu svojih tvrdnja o Faradayevu stanovištu prema pitanju,

<sup>114</sup> Preston, l. c., p. 133. — Kurziv je u originalu.

<sup>114a</sup> Vidi 2. poglavlje ove radnje, pod *b*).

<sup>114b</sup> Faraday's Diary, § 257.

da li silnice miruju ili se vrte s magnetom. Dok Preston uprav kritizira i pobija Faradaya pripisujući mu nazor, da silnice miruju, Exner i Czermak proti Edlundu pripisuju hipotezu o vrtnji silnica s magnetom samom Faradayu. Hoppe u svojoj Povijesti Fizike<sup>115</sup> navodi, da je Faraday bio prvi, koji je nabacio pitanje, da li silnice miruju ili se vrte s magnetom. On donosi u prevodu najprije jedan dio poznatog mjesta iz poglavlja 3090 u XXVIII. nizu Eksperimentalnih Istraživanja, gdje se Faraday izražava u prilog hipotezi o mirovanju silnica<sup>116</sup>. Ali odmah nadodaje: »Faraday hat diese Ansicht aber nicht als unabänderlich angesehen«, pa kao potvrdu za to citira u prevodu nešto starije riječi iz Faradaya eva prikaza njegovih radnja o atmosferskom magnetizmu, koje riječi niže navodim u cijelosti.<sup>117</sup> Još i posljednjih godina su Crampa i Norgrove s jedne, a Howes druge strane iznijeli o Faradayevu mišljenju suprotna gledišta<sup>118</sup>. Premda je cijelo ovo pitanje o pomičnosti ili nepomičnosti silnica kod rotacije magneta loše postavljeno, jer počiva na pretjerano realnom zamišljanju silnica, potrebno je iz razloga povjesne istine razjasniti Faradayevo stanovište u ovom pitanju. Jer zaista je činjenica, da je Faraday godine 1851. prvi izričito postavio — a ne samo nabacio — pitanje, da li silnice miruju ili rotiraju s magnetom. To se mjesto, koje Hoppe u po svoj prilici nije bilo poznato, nalazi u Dnevniku. Kad sam pretprošle godine dobio od g. Crampa primjerak diskusije o radnji Crampa i Norgrovea, ustanovio sam, da su već oni upozorili na to mjesto, i to, kako mi se čini, prvi.<sup>119</sup> Samo oni nijesu cijelu stvar dovoljno rasvijetlili.

Potrebno je ponajprije promotriti, što Faraday razumijeva pod silnicom (line of force), jer i u tom pogledu postoje raznolika mišljenja, koja nijesu u svemu ispravna. Kod toga ne ćemo zalaziti u Faradayevo mišljenje o fizikalnoj opstojnosti silnica. U po-

<sup>115</sup> Edm. Hoppe, *Gesch. d. Physik*, Braunschweig 1926., S. 448—449.

<sup>116</sup> Vidi napomenu <sup>152</sup>. — Hoppe citira od »The system of power« do »amongst its own forces«, ispuštajući riječ »necessarily« i poredbu sa sunčanim zrakama.

<sup>117</sup> Vidi napomene <sup>139</sup> i <sup>140</sup>.

<sup>118</sup> W. Crampa i E. H. Norgrove, *Journ. Inst. Electr. Eng.* 78, 481, 1936, p. 481; 79, 344, 1936, p. 347. — G. W. O. Howes, *ibid.* 79, p. 345. — Ni mišljenje Crampa i Norgrovea na prvom mjestu nije u skladu sa citatom iz Dnevnika, koji oni donose na drugom mjestu.

<sup>119</sup> Crampa i Norgrove, *ibid.*, 79, p. 347.



gledu definicije silnice osobita važnost pripada spomenutim njegovim radnjama iz g. 1851. (XXVIII. i XXIX. niz). U poglavlju 3071 prve radnje on daje trojaku definiciju silnice: ona se može definirati ili poznatim načinom pomoću kratke magnetne igle, ili kao krivulja, po kojoj moramo pomicati kratku poprečnu žicu, a da se tim micanjem ne inducira struja, ili se napokon da definirati pomoću položaja, koje zauzima kristal bizmuta. U spomenutom prikazu ovih dviju radnja nalazimo opet prve dvije definicije iskazane skoro istim riječima, dok je definicija pomoću bizmuta ispuštena.<sup>120</sup>

Na prvi bi se mah moglo odavle činiti, da je Faraday u ono, što otkriva magnetna igla, identično s onim, što stvara indukciju u žici, koju pomičemo; t. j. moglo bi se činiti, da su u Faradayevim očima silnice, definirane Coulombovom silom, identične s indukcijonim linijama. To tim više, što se one po Faradayu opažaju pomoću željezne piljevine ili pomoću magnetne igle<sup>121</sup>. Ali stvar ne stoji tako. Naprotiv Faraday, kako je prije istaknuto, u objema radnjama utvrđuje potrebu elektrodinamskog određivanja silnica<sup>122</sup>. Istina, elektrodinamska metoda nije tako osjetljiva kao metoda magnetne igle.<sup>123</sup> Ali metoda magnetske igle je nepouzdana, jer magnetna igla kvari magnetno polje već samom svojom prisutnošću<sup>124</sup>, pa ne daje pouzdanih podataka ni za jakost magnetnog polja ni za zakrivljenost silnica<sup>125</sup>. Isto tako ni željezna piljevina ne prikazuje vjerno okolice magneta, već ju znatno kvari<sup>126</sup>. A razlog je tome, što magnetna igla reagira u magnetnom

<sup>120</sup> Faraday, l. c. <sup>84</sup>, p. 402—403.

<sup>121</sup> Faraday, ibid., p. 403.

<sup>122</sup> Vidi i Dnevnik, §§ 11423, 11565.

<sup>123</sup> Faraday, Exp. Res., vol. III, Ser. XXVIII, § 3083.

<sup>124</sup> Faraday, ibid., § 3176: »The wire when quiescent does not sensibly disturb the arrangement of the force in the magnetic field; the needle when present does«.

<sup>125</sup> Faraday, ibid., vol. III, Physical Lines of Magnetic Force, § 3280: »The reason why a magnetic needle would fail as a correct indicator of power present in a given space, is...« i dalje.

<sup>126</sup> Faraday, ibid., Ser. XXIX, § 3235, p. 398: »It is to be remembered, however, that the filings disturb in some degree the conditions of the magnetic power where they are present«. — Ibid., l. c. <sup>125</sup>, § 3254: »But the simple disposition of the lines, as they are shown by iron particles, cannot as yet be brought in proof of such a curvature, because they may be dependent upon the presence of these particles and their mutual action on each other and the magnets«.

polju samo na osnovu toga, što ona *kvari magnetno polje*<sup>127</sup>. Svih tih smetnja nema kod metode pomicanja žice, kako to F a r a d a y ističe na više mjesta. Pomicana žica »zahvaća u fiziku predmeta na posve drugi način nego magnetna igla«<sup>128</sup>.

Spomenuti citat iz F a r a d a y eva poglavlja 3157 aktuelan je i danas, jer se smjer i jakost magnetnog polja još uvijek definiraju pomoću C o u l o m b ove sile na jedinicu magnetne množine. Didaktički razlozi tu prevladaju nad stvarnima, pa upadamo u pogrešku, koju je već F a r a d a y nastojao izbjeći: naš teoretski indikator *kvari* ono, što hoćemo da mjerimo ili definiramo pomoću njega. Takva definicija dakle smije imati samo približan značaj. To je jedna od nesuvislosti u osnovnim pojmovima nauke o elektricitetu i o magnetizmu, na koju je nedavno upozorio i C r a m p<sup>129</sup>. Ova poteškoća bit će po svoj prilici razlog, s kojega je L o r e n t z kod definiranja jakosti električnog i magnetskog polja pomoću C o u l o m b ovih sila uveo beskonačno malene jedinice množine elektriciteta i magnetizma<sup>130</sup>, jer takvim umanjivanjem i sami poremećaji postaju beskonačno maleni. Pridolazi i to, da djelovanje polja na jedinicu množine u nehomogenom polju nije isto kao u homogenom<sup>131</sup>.

U pogledu definicije silnica stoji F a r a d a y i ispred prvih M a x w e l l ovih radnja, jer M a x w e l l u svojoj raspravi o F a r a d a y evim silnicama<sup>132</sup> kao i u raspravi o fizikalnim silnicama<sup>133</sup> daje samo definiciju pomoću C o u l o m b ove sile. Ipak se on na ovom drugom mjestu ograđuje tim, što naglašuje, da one nijesu definirane mehaničkim silama, nego da tamo postoji izvjesno fizi-

<sup>127</sup> F a r a d a y, *ibid.*, Ser. XXVIII, § 3157: »A magnetic needle, or a oblong piece of iron, would not show it in the air or elsewhere except by disturbing the equal arrangement of the force and rendering it unequal«.

<sup>128</sup> F a r a d a y, *ibid.*, Ser. XXVIII, § 3176: »The value of the moving wire or conductor, as an examiner of the magnetic force, appears to me very great, because if touches the physics of the subject in a manner altogether different to the magnetic needle«. I Kalischer prevodi riječi »because if touches« kao da stoji »it« (weil er... anfasst). — Vidi takodjer dalje u istom § 3176. Zatim l. c. <sup>125</sup>, § 3271: »whether the wire be quiescent or in motion, it does not cause derangement, or expansion, or contraction of the lines of force«.

<sup>129</sup> W. C r a m p, *The Electrician* 121, 122, 151, 1938.

<sup>130</sup> H. A. L o r e n t z, l. c. <sup>59</sup>, S. 79.

<sup>131</sup> A b r a h a m u. F ö p p l, l. c. <sup>60</sup>, S. 91, 142—143.

<sup>132</sup> M a x w e l l, l. c. <sup>50</sup>, S. 7.

<sup>133</sup> M a x w e l l, *On Physical Lines of Force*, O s t w a l d's Klass. Nr. 102, S. 3—5.



kalno stanje ili izvjesno djelovanje s dovoljno energije da proizvede pojave, koji se tamo zbivaju. On spominje u prvoj radnji F a r a d a y ev XXVIII. niz, ali ne spominje njegove elektrodinamske definicije silnica iz poglavlja 3076. Ovu spominje istom u svom glavnom djelu<sup>134</sup>. O tome dakako ne može biti sumnje, da M a x w e l l pod nazivom »line of force« misli na indukcijone linije, pa u vezi s tim i naglašuje, da je sve matematički točno, što je F a r a d a y rekao o magnetskim silnicama, ako se pod tim misli na indukcijone linije<sup>134</sup>.

Još bi mogao smetati F a r a d a y ev izraz »line of force«; rjeđe kod njega dolazi za sustav silnica »sum of power« (§§ 3073, 3109) ili »system of power about the magnet«. Da se pod riječima *force* i *power* ne može razumjeti mehanička sila, slijedi iz izraza kao: »sum of power contained in any one section of a given portion of the lines« (§ 3073); (igla ne pokazuje) »the amount of power present in a given space« (§ 3280), »amount of force« (vol. III, p. 402), »amount of magnetic force(s)« (§§ 3109, 3117), »an atmosphere of power about a magnet« (§ 3271). Riječi *amount* treba ovdje dati isto značenje, koje joj pripada u izrazu »the whole amount of Electricity evolved«<sup>135</sup>. Po svemu izlazi, da pod *force* i pod *power* F a r a d a y misli moć magneta da inducira struju (dotično elektromotornu silu) u žici, koja se giba; tako da bi *amount of power* odgovarao magnetnom toku.

Prema tome ne može biti sumnje o tome, da F a r a d a y eve *lines of force* zaista znače indukcijone linije kao i kod M a x w e l l a, koji vrlo rijetko upotrebljava naziv »line of induction«. Ni u njemačkoj literaturi nijesu se udomaćili novi nazivi kao »Erregungslinie« (L o r e n t z) i »Feldlinie« (M i e, P o h l) pored starog naziva »Kraftlinie« i novijeg, ali rijedjeg »Induktionslinie«. Kod nas je naziv »silnica« već ustaljen, pa ne će smetati, ako ga ovdje zadržim u smislu indukcionih linija. — S izvjesnog gledišta dobro odgovara i naziv »flux line«, koji susrećemo u američkoj literaturi.

Vratimo se na prijeporno pitanje o vrtnji ili mirovanju silnica kod F a r a d a y a. Prije navedeni citat, kojim on završuje poglavlje 220 Eksperimentalnih Istraživanja, o nezavisnosti magne-

<sup>134</sup> M a x w e l l, l. c. <sup>95</sup>, vol. II, § 404.

<sup>135</sup> F a r a d a y's Diary, § 11354.

tizma i štapa, u kome se on nalazi<sup>136</sup>, u vezi sa cijelim putem, kojim je Faraday dotle došao, pokazuje, da je g. 1831. za Faradaya bilo izvan svake sumnje, da je vrtnja magneta bez utjecaja na njegove silnice, t. j. da ove miruju. Mjesto, na koje se poziva Hoppe, nalazi se u radnji o atmosferskom magnetizmu iz travnja g. 1851.,<sup>137</sup> koja se ima smatrati pregledom dijela sadržaja niza XXVI. i niza XXVII., u kojima velik broj poglavlja rade o istom predmetu. I zaista, u nizu XXVI., u poglavlju 2919 nalazimo Faradayevo razlaganje, koje sadrži posve iste misli kao ono mjesto, na koje se poziva Hoppe. U poglavlju 2919 nalazimo ovo: »Silnice, koje izlaze iz jednog magneta, smještene su i pričvršćene, da tako kažem, svojim korjenovima na jedan način, koji eksperimentalno dobro razumiju oni, koji su radili s ovim predmetom. Na isti način su i silnice, koje već prema veličini inklinacije izlaze iz zemlje više ili manje naglo, dolje držane jednom silom, koja tu djeluje...«. <sup>138</sup> O tom pričvršćivanju (»fixation«) silnica na njihovom donjem kraju opet govori na kraju istog poglavlja.

Mjesto, na koje se Hoppe poziva, glasi posve slično. Donosim ga ovdje u cjelini, dok Hoppe navodi u prevodu samo prvi dio. »Svi su razlozi za to da se vjeruje, da su ove crte *pričvršćene* u zemlji, iz koje se dižu<sup>139</sup> i od koje su proizvedene, isto kao što su crte, koje izlaze iz jednog magneta, držane od njega, premda ne u istom stupnju; te da će svaka smetnja, koja djeluje na njih odozgo, prouzročiti veću promjenu u njihovom položaju i njihovom pravcu u atmosferi i u prostoru iznad nje nego dolje u zemlji«<sup>140</sup>. Kako on zamišlja to pričvršćivanje silnica u zemlji, pri-

<sup>136</sup> Vidi napomenu 31.

<sup>137</sup> Faraday, Exp. Res., vol. III, p. 323—327 (»On Atmospheric Magnetism«).

<sup>138</sup> Faraday, ibid., Ser. XXVI, § 2919: »The lines of force which issue from a magnet are, as it were, located and fixed by their roots in a way well understood experimentally by those who have worked upon this subject. In the same manner the lines which issue from the earth more or less suddenly, according to the amount of inclination, are held beneath by a force of location; and because of the unchanging action of the earth in respect of atmospheric effect, are restrained more or less from alteration beneath during the changing action of the atmosphere«.

<sup>139</sup> Dotle citira Hoppe.

<sup>140</sup> Faraday, l. c. <sup>137</sup>, p. 324: »There is every reason to believe that these lines are *held* in the earth, out of which they arise and by which they are produced, just as the lines which originate in a magnet are held by it, though not in the same degree; and that any disturbance from above affecting them will cause a greater change in their place and direction in the atmosphere and space above, than in the earth beneath«. — Kurziv je i u originalu.



kazao je slikom 14 na str. 249, gdje silnice samo zalaze u zemlju svojim korjenovima, a ne nastavljaju se u njoj. O djelovanju tih vanjskih uzroka, koji prouzrokuju promjene silnica u atmosferi, govori pobliže u poglavlju 2920 i u idućim poglavljima niza XXVI. — Iz svega se vidi, da ovdje nema govora o rotaciji silnica sa zemljom, nego F a r a d a y ističe njihovu relativnu nepomičnost u zemlji prema njihovoj promjenljivosti u atmosferi pod utjecajem vanjskih uzroka.

U ostalom svoje konačne poglede na silnice u n u t a r m a g n e t a iznio je F a r a d a y istom pola godine kasnije u nizu XXVIII. upravo na osnovu istraživanja o unipolarnoj indukciji na rotirajućem magnetu. On tu u poglavlju 3117 iznosi spoznaju, da su silnice zatvorene krivulje, koje se nastavljaju i kroz magnet. »Također, prema ovom podatku postoje silnice u magnetu, iste *prirode* kao vanjske. Čak što više, one su *iznosom* točno jednake vanjskima. . . . i one su u stvari njihov nastavak posve isti po svojoj prirodi. . . .«<sup>141</sup>. Napokon treba i to uzeti u obzir, da F a r a d a y u poglavlju 3165 pri kraju ove radnje izjavljuje, da je u nizovima XXV. do XXVII. naziv *lines of force* katkada upotrebljavao u izvjesnom dosta neodređenom smislu (»so vaguely«). Ne ističe pojedinačno, na što se odnosi ta neodređenost. — Na svaki način vidi se iz svega, da mjesto citirano od H o p p e a nema dokazne snage, koju mu je on htio pripisati.

Međutim se iz Dnevnika i iz XXVIII. niza vidi, da se u drugoj polovini g. 1851. F a r a d a y u svojim mislima zaista bavio i mogućnošću, da bi se silnice mogle vrtjeti s magnetom. Moguće je, da je to došlo kao posljedica malo ranijih misli iz mjesta, koja smo upravo citirali, a moguće je i to, da mu je tome dao povod upravo sastav spomenutog njegovog aparata iz XXVIII. niza, gdje se njegov magnet sastojao od dvaju paralelnih magneta u malenom međusobnom razmaku s istim polovima na istoj strani<sup>142</sup>, a žica se kod prvih pokusa izolirano provlačila između njih do zajedničkog

<sup>141</sup> F a r a d a y, *ibid.*, Ser. XXVIII, § 3117: »So, by this test there exists lines of force within the magnet, of the same *nature* as those without. What is more, they are exactly equal in *amount* to those without. They have a relation in *direction* to those without; and in fact are continuations of them, absolutely unchanged in their nature, so far as the experimental test can be applied to them«. — Kurziv je u originalu. — Vidi i Dnevnik, §§ 11410—11411,

<sup>142</sup> F a r a d a y, *ibid.*, § 3085: »so that they shall act as one magnet«; § 3100: »the two magnets. . . act truly as one central magnet«.

ekvatora, da se odatle u luku savije natrag k osi rotacijonog aparata izvan polova magneta. Kad se stvar točnije promotri, i danas nalazimo poteškoće, ako želimo bilo hipotezom *rezanja* silnica bilo hipotezom njihova *obuhvaćanja* kvantitativno protumačiti indukciju u unutrašnjem radijalnom dijelu F a r a d a y eve ekvatorijalne žice, kad se magnet okreće, a vanjski luk žice miruje, jer se taj dio žice nalazi u prostoru siromašnijem na silnicama. Prema tome nije s ovog gledišta razumljiv ni rezultat spomenutog F a r a d a y eva glavnog pokusa u uprav opisanoj temeljnoj izvedbi, gdje su žica među magnetima i njezin vanjski luk činili neprekidnu petlju.<sup>142a</sup>

Prema Dnevniku započela su kolebanja F a r a d a y eva s prvim pokusima na tom aparatu. U poglavlju 11328 on izričito pretpostavlja: »pretpostavljajući, da se za silnice ima smatrati, da se ne miču s magnetom«<sup>143</sup> kod njegove vrtnje. Medjutim već u § 11330 kod izricanja negativnog rezultata svog osnovnog pokusa on naglašuje pretpostavku, da silnice rotiraju: »Ako se *magnet* sa svojim sustavom silnica i *žica* vrte istom kutnom brzinom *istodobno*...«<sup>144</sup> Ali njegovo razlaganje u poglavlju 11333 opet stoji u znaku silnica koje miruju, jer obradjuje pretpostavku, da vanjska žica (»the exterior part of the wire«), koja se vrti zajedno s magnetom, *reže* silnice<sup>145</sup>. Sva su ova poglavlja napisana u isti dan (12. VII.). — U idućoj skupini pokusa s istim izoliranim načinom vođenja žice javljaju se nove sumnje, ali uz očitu pretpostavku, da silnice miruju, jer magnet miruje: »Tako, ako *magnet miruje*, a *žica se giba* poprijeko kroz magnetske silnice, nastaje električna struja. Nastaje li ona u žici, koja se giba ili u žici unutar magneta?«<sup>146</sup>. Medjutim je F a r a d a y u poglavlju 11342 učinio

<sup>142a</sup> F a r a d a y's Diary, §§ 11324, 11325, 11329; Exper. Res., Ser. XXVIII, §§ 3091, 3092, 3095 i str. 404.

<sup>143</sup> F a r a d a y's Diary, § 11328: »supposing the lines of force are to be considered as having no motion with the magnet«.

<sup>144</sup> F a r a d a y, ibid., § 11330: »When the *magnet* with its system of forces and the *wire* move with the same angular velocity in the same time...« — Kurziv je u originalu. Vidi napomene <sup>294</sup> do <sup>296</sup>.

<sup>145</sup> F a r a d a y, ibid., § 11333: »and as these parts of the wire move with equal angular velocity and cut so to say the same curves...«.

<sup>146</sup> F a r a d a y, ibid., § 11341: »So when the *magnet* is still, and the *wire* moving through and across the lines of magnetic force, an electric current is generated. Is it generated in the moving wire or in the wire within the magnet?« — Kurziv je u originalu. »The wire within the magnet« je dio žice među magnetima, koji je gore nazvan radijalnom i aksijalnom žicom. U skladu s razmatranjima u § 11335, F a r a d a y promatra svoj složeni magnet kao jedan



izmjene u načinu vođenja žica, koje je pobliže opisao u poglavljima 3095 i 3096 u XXVIII. nizu, tako da su konačno aksijalni i radijalni dio žice zamijenjeni samim magnetom.<sup>147</sup> Nakon tih izmjena on daje odgovor na ovo pitanje odmah u početku poglavlja 11345: struja se može inducirati samo u vanjskoj žici, jer se ona giba. Ali se odmah javlja glavno pitanje: gdje se inducira struja, koju pokazuje galvanometar, kad magnet rotira, a vanjska žica miruje? Inducira li se ona u vanjskoj žici tim, što se silnice vrte zajedno s magnetom ili se ona inducira u magnetu, koji se giba kroz silnice, kako je on to mislio 20 godina ranije u poglavlju 220 u II. nizu? »Vrte li se silnice s magnetom ili ne?«. <sup>148</sup> Tim je postavljen od samog Faradaya ovaj problem, koji se provlači kroz naučne rasprave gotovo sve do današnjeg dana. Ipak možemo zbog ograničene dostupnosti njegovog Dnevnika u prošlosti smatrati skoro sigurnim, da ovo njegovo pitanje nije imalo upliva ni na ponovno postavljanje ovoga pitanja u doba, kad su ga postavili Preston i Hoppe, ni na njegov razvoj.

Faraday se u toku idućih dana ponovno vraća na ovo pitanje. U poglavlju 11366 pitanje, gdje nastaje struja, ostavlja otvorenim (»remains to be proved«). U poglavlju 11372 (dne 18. VII.) ističe, da nezavisnost otklona galvanometra o obliku vanjskog vodiča još ne dokazuje, da struju ne induciraju upray u tom vodiču silnice, koje se vrte s magnetom.<sup>149</sup> U poglavlju 11384 ističe pretpostavku vrtnje silnica u vezi s istim pitanjem nezavisnosti o obliku vanjskog dijela kruga,<sup>150</sup> pa ovu pretpostavku upotrebljava i kasnije

<sup>147</sup> Vidi kraj poglavlja 11346 u Dnevniku.

<sup>148</sup> Faraday, *ibid.*, § 11345: »When the magnet is still and the wire is moving, it seems unlikely that the current should be generated any where else than in the moving wire; for its motion or quiescence makes all the difference. But then, when the magnet is moving, where is the current then generated? In the wire across which the curves, that may be supposed to move with the magnet, are passing? Or in the magnet, which may be supposed to be moving (as the wire did) whilst the curves are considered as still? Do the lines of force revolve with the magnet or do they not?«. — To je ono mjesto, na koje su najprije upozorili Cramp i Norgrove. — Kurziv u prevodu ja sam potertao.

<sup>149</sup> Faraday, *ibid.*, § 11372: »This does not prove that the current is not generated in the wire by the moving system of forces of the moving magnet«.

<sup>150</sup> Faraday, *ibid.*, § 11384: »If it be supposed for a moment that the solenoid of power revolves with the magnet and is cut by the external fixed wire, i. e. that the external wire is the place of generation of the current, then variations of this wire might be expected to produce some effect«. — Kurziv sam ja potertao.

u poglavlju 3099 niza XXVIII., da bi tu nezavisnost protumačio. Međutim od 25. VII. dalje, već pri kraju ove skupine istraživanja, nalazimo samo takve načine izražavanja, koji odgovaraju pretpostavci, da silnice miruju. Na to upućuju već 24. VII. ona mjesta u §§ 11380 i 11381, gdje ističe, da je radijalni dio žice među magnetima onaj, koji se giba.<sup>150a</sup> U poglavlju 11396 ističe pretpostavku, da struja nastaje u onom dijelu kruga, koji se giba.<sup>151</sup> U poglavlju 11404 vraća se na svoj stari pokus s bakrenom pločom na glavi magneta i tumači indukciju tim, da ploča u vrtnji reže magnetske silnice.

Ali iz spomenutog XXVIII. niza Eksperimentalnih Istraživanja, koji je nastao iz ove skupine pokusa u Dnevniku, vidi se, da je Faraday konačno ostao pri svojoj staroj predodžbi, da silnice miruju, ako magnet rotira. Najprije je tu poglavlje 3090, koje služi kao uvod u pokuse s rotacijom magneta. To je ono poglavlje, koje je Preston pobijao zbog Faradaya eva razlikovanja između tranzlacije i rotacije, pa ga i zbog toga donosim u cjelini. »Ako se za silnice govori, da režu jedan krug vodiča, mora se smatrati, da se to zbiva *tranzlacijom* magneta. Sama vrtnja magnetskog štapa oko njegove osi ne izvodi nikakvog indukcionog učinka u krugovima izvan njega; jer tada nijesu ispunjeni uslovi, koji su gore opisani. Za sustav silnica oko magneta ne mora se nužno držati, da rotira s magnetom, isto kao što se za zrake svjetlosti, koje izlaze iz sunca, ne pretpostavlja, da rotiraju sa suncem. Za magnet možemo čak u stanovitim slučajevima smatrati, da se vrti među svojim silnicama i da proizvodi potpuni električni učinak, koji se da opažati na galvanometru«<sup>152</sup>. Tu Faraday čini oštru razliku između tranzlacije i rotacije. Vanjski krugovi, o kojima govori, bit će samo

<sup>150a</sup> Faraday, *ibid.*, § 11380: »... and the moving part of the wire was the curved part between the magnet equivalent to a radius«; § 11381: »This radial part was the moving part...«.

<sup>151</sup> Faraday, *ibid.*, § 11396: »But if the generation of the current be assumed as existing in the *moving part*...«. — Kurziv je u originalu.

<sup>152</sup> Faraday, *Exp. Res.*, vol. III, Ser. XXVIII, § 3090: »When *lines of force* are spoken of as crossing a conducting circuit, it must be considered as effected by the *translation* of a magnet. No mere rotation of a bar magnet on its axis, produces any induction effect on circuits exterior to it; for then, the conditions above described are not fulfilled. The system of power about the magnet must not be considered as necessarily revolving with the magnet, any more than the rays of light which emanate from the sun are supposed to revolve with the sun. The magnet may even, in certain cases, be considered as revolving amongst its own forces, and producing a full electric effect, sensible at the galvanometer«. — Kurziv je u originalu.



zatvoreni krugovi, koji nemaju veze s magnetom, a o kojima rade poglavlja 3093 i 3094.

Oprezni način izražavanja (*«must not be considered as necessarily revolving»*) ne može se smatrati izrazom nesigurnosti. Na to upućuje najprije činjenica, da cijelo razlaganje u idućem poglavlju 3091 i u daljim poglavljima (osim poglavlja 3099), kao i u izvatku iz ove radnje,<sup>153</sup> počiva na pretpostavci, da se struja inducira u onom dijelu kruga, koji se giba, t. j. na pretpostavci, da silnice miruju. Treba osobito istaknuti mjesta u poglavljima 3098 i 3102, gdje Faraday imenuje radijalnu žicu u ekvatoru kao jedino mjesto, gdje se mogla inducirati struja kod vrtnje magneta,<sup>153a</sup> kao i isticanje činjenice, da je u tome sama kovina magneta kod vrtnje ekvivalentna radijalnoj žici (poglavlja 3118 i 3137). U spomenutom poglavlju 3099 on doduše tumači nezavisnost inducirane struje od veličine i oblika vanjskog dijela kruga tako, kao da silnice rotiraju, kako je to već učinio i u Dnevniku (l. c.). Medjutim treba promisliti, da je samo uz takvu hipotezu potrebno objašnjavati tu nezavisnost, dok je uz pretpostavku, da silnice miruju, stvar po sebi jasna. U prilog ovakvom shvaćanju govori i stilizacija u poglavlju 11384 Dnevnika, koje je prije citirano. — Napose govore za pretpostavku, da silnice miruju, ona mjesta, gdje Faraday negativni ishod svog osnovnog pokusa (istodobna rotacija magneta i vanjskog vodiča) tumači tim, da se u magnetu i u vanjskom vodiču radjaju suprotne struje ili suprotne težnje struje<sup>154</sup>. Jer ako silnice rotiraju, onda u ovom pokusu u opće ne dolazi do indukcije ni u magnetu ni u vanjskom vodiču. To je zapazio već

<sup>153</sup> Faraday, Exp. Res., l. c. <sup>84</sup>.

<sup>153a</sup> N. pr. u § 3098: *«the small wire, db, being, however, the only part in which this current could be generated by the motion»*. — Žica db je radijalna žica dužine 0,5 do 0,6 palca (Diary, V, § 11381). — Slično ponavlja opet u § 3118: *«all the effect being produced by that part which represents a radius between the axis and the equator»*.

<sup>154</sup> Faraday's Diary, § 11585 (vidi napomenu <sup>83</sup>); Exp. Res., vol. III, Ser. XXVIII, §§ 3108, 3109, i konačna redakcija u izvatku radnje (l. c. <sup>84</sup>) na str. 404: *«Thus it was shewn, that when the magnet and the wire revolved in the same direction, contrary currents of electricity, exactly equal to each other, tended to be produced; that those outside resulted from the intersection by the outer wire of the lines of magnetic force external to the magnet...»*. — Ima mjesta, gdje on drukčije izražava ovaj negativni ishod pokusa (Dnevnik §§ 11330, 11336; Exp. Res., §§ 3092, 3095, 3096; n. pr.: *«no trace of an electric current was produced»*). Ali on na tim mjestima izriče neposredno rezultat opažanja otklona nula na galvanometru, a ne daje tumačenja o tome.

Preston, pa je na osnovu toga nijekao ovom Faradayevu pokusu svaku dokaznu snagu.<sup>155</sup> —

Preston se u pitanju rotacije silnica javio nekoliko godina kasnije s predlogom novog pokusa, prema rezultatu kojega bi se imalo odlučiti, da li silnice rotiraju ili miruju<sup>155a</sup>. Zamišljeni uređaj odgovara poznatom Faradayevu pokusu s pločom pred čelom magnetu, samo s tom razlikom, da kod Prestona ploča, koja treba da stoji izolirano, miruje, a magnet rotira. To je prije spomenuta varijanta, koja je Faradayu dala negativan rezultat<sup>155b</sup>. Preston taj pokus spaja s elektrostatskim opažanjem. Ako silnice miruju, nastat će naboj u magnetu, pa će on izazvati influenci-rani naboj na ploči. Ako silnice rotiraju, magnet nema naboja, ali će u ploči primarno nastati radijalna raspodjela naboja. Dakle bi raspodjela naboja na ploči imala dati odgovor na postavljeno pitanje. Preston se obratio Hertz u s molbom za mišljenje o ovoj zamisli. Poslije Hertzovalog odgovora, da bi uz normalnu osjetljivost ondašnjih elektrometara bile potrebne velike brzine rotacije i velik magnet, da bi se efekt mogao dokazati, Preston nije ni kušao izvesti ovaj pokus. Pripomenuti je, da ovaj Prestonov predlog potpuno ispunja uslove pokusa na otvorenom krugu, kakve je nekoliko godina kasnije tražio Hopp e. — Samo u svrhu potpunosti spomenuo bih, da i prvi od pokusa, koje je u krupnim crtama u ovo doba predložio Lodge<sup>155c</sup> kao obrat Rowlandovog pokusa, pripada među pokuse o unipolarnoj indukciji na otvorenom krugu. U drugom od Lodgeovih predloga odgovarao bi rotirajući elektromagnet, kako mi se čini prema dosta nejasnom opisu, dvostruko izvedbi radijalno magnetiziranog kotača Satyendra Raya. —

Premda je u običnim prilikama sve jedno, da li zamišljamo, da silnice miruju, pa tim indukcija nastaje u magnetu, koji rotira, ili zamišljamo, da silnice s njim rotiraju, pa tim indukcija nastaje u nepomičnom vanjskom vodiču, Lecher je upozorio na neke neobične poteškoće, na koje u pojedinačnim slučajevima vodi hipoteza o rotaciji silnica s magnetom<sup>156</sup>. Ako je magnet djelomično

<sup>155</sup> Preston, l. c., p. 136.

<sup>155a</sup> S. T. Preston, Phil. Mag. (5) 31, 100, 1891.

<sup>155b</sup> Vidi napomenu <sup>114b</sup>.

<sup>155c</sup> O. Lodge, Phil. Mag. (5) 27, 469, 1889. — Vidi takodjer: O. Lodge, Modern Views of Electricity, § 73; njemački prevod, Leipzig 1896, S. 184—185.



okružen željeznim oklopom, pa galvanometarski vod ide kroz ne-oklopljeni prostor, moralo bi se uvesti hipotezu, da se silnice kroz oklop giblju sporije, a izvan oklopa brže od kutne brzine magneta, ako hoćemo da zakon indukcije bude ispunjen kvantitativno. Sa svim tim ne da se, kako *Lecher* ističe, pokusima na jednom magnetu donijeti odluka ni za jednu ni za drugu hipotezu. Pripomenuti je, da i *Hoppe* ističe nemogućnost takve odluke galvanometričkim mjerenjima i u opće mjerenjima na zatvorenom krugu; po svemu se vidi, da i on kod toga misli na pokuse s jednim magnetom.<sup>157</sup> *Lecher* pak pokazuje, da se posebne nove teškoće za hipotezu o rotaciji silnica javljaju, ako se upotrebe dva koaksijalna cilindrička magneta, jedan u nastavku drugoga sa suprotnim polovima u malenom razmaku.<sup>158</sup> Na takvom uređaju je *Lecher* zasnovao svoj *experimentum crucis*.<sup>159</sup> Osovine na unutrašnjim glavama obaju magneta, oko kojih oni rotiraju, izrađene su od ebonita, tako da su tu magneti aksijalno izolirani. Međutim su opsezi tih unutrašnjih glava međusobno spojeni kroz jedan žlijeb sa živom. Galvanometar je uklopljen između vanjskih osovine magneta. Ako magneti rotiraju istodobno suprotnim smjerovima, *Lecher* dobiva otklon 66 dijelova, koji je dva puta veći nego otklon, koji daje rotacija jednog magneta. Takav je otklon upravo trebalo očekivati s gledišta hipoteze nepomičnih silnica. Po hipotezi o rotaciji silnica trebao bi pak otklon posve ili skoro iščeznuti. Da ovo bude jasno, možemo se poslužiti projekcijom vanjskog dijela kruga uzduž skrajnje silnice u ekvatorijalnu ravninu, kako ćemo to objasniti u jednom kasnijem poglavlju. Neka je to zajednička ekvatorijalna ravnina obaju magneta. Onda su elektromotorne sile, inducirane u toj zajedničkoj ekvatorijalnoj ravnini rotacijom silnica s lijeve i s desne strane u suprotnim smjerovima, jednake i suprotne. Dakle se ovom *Lecher*ov u pokusu ne može nijekati dokazna snaga. Kod toga se ni ne obaziremo na poteškoće, kakve bi donijela zamisao tih silnica, koje su obim magnetima zajedničke, a koje bi se u jednoj polovini polja trebale okretati jednim, a u drugoj polovini polja suprotnim smjerom.

Posljednje godine prošlog vijeka i prve godine našeg vijeka donijele su neobično velik broj radnja o unipolarnoj indukciji i njoj

<sup>157</sup> E. Hoppe, Phys. ZS. 5, 650, 1904; Gesch. d. Physik, S. 449.

<sup>158</sup> Lecher, Wiener Ber., I. c., S. 964—966.

<sup>159</sup> Lecher, ibid., S. 975—977.

bliskom području. Te radnje, dobrim dijelom teoretske, grupiraju se u tri skupine oko triju eksperimentalnih radnja, koje su izašle u to doba: prva skupina oko spomenute *Lecher*ove radnje i njegove iduće radnje o rotacijonim aparatima;<sup>160</sup> druga skupina oko prve *Hoppe*ove radnje<sup>161</sup> iz ovog razdoblja; treća skupina oko druge *Hoppe*ove radnje.<sup>162</sup> Skoro osamljeno stoje prva<sup>163</sup> i druga<sup>164</sup> *Grottrian*ova radnja, koje su obje eksperimentalne. Možda je druga *Hoppe*ova radnja djelomično potaknuta prvom *Grottrian*ovom radnjom. — Za sada ispuštam odavle radnje, koje obradjuju unipolarnu indukciju s gledišta *Maxwellove* i *Hertze*ove teorije.

*Lecher* je već u svojoj prvoj radnji nijekao, da bi vodič, kroz koji teče struja, mogao dovesti jedan magnetni pol u trajnu rotaciju uzduž svojih silnica. Neposredni povod ovoj njegovoj radnji o eksperimentalnoj i teoretskoj bludnji kod tumačenja *Pohl*ova aparata za *Faraday*eve rotacije dala mu je *König*ova radnja<sup>165</sup> o jednom rotacijonom aparatu, koji je prvi opisao *Fleischmann*<sup>166</sup>. Smjernica te *Lecher*ove radnje je, dokazati nemogućnost upotrebe *Biot-Laplace*ova elementarnog zakona za tumačenje elektromagnetskih rotacija. Na to su došle djelomično već spomenute radnje *Königa*<sup>167</sup>, *Lorberga*<sup>168</sup>, *Hagenbacha*<sup>169</sup> i *Olshausena*<sup>169</sup>, u kojima ovi pisci pobijaju *Lecher*ove nazore primjenom elementarnih i potencijalnih zakona. — Ovamo treba pribrojiti i *Vollgraff*ovu dizertaciju<sup>170</sup>, a bit će da u ovu skupinu pripada i *Huth*ova dizertacija<sup>171</sup>; ni jedna ni druga mi nijesu pristupačne.

Dvije su karakteristike spomenutih radnja. Primjena elementarnih i potencijalnih zakona ostatak je ideja o djelovanju na

<sup>160</sup> E. Lecher, Wiener Ber. 108, 977, 1899; Wied. Ann. 69, 781, 1899.

<sup>161</sup> Edm. Hoppe, Ann. d. Phys. (4) 8, 663, 1902.

<sup>162</sup> Edm. Hoppe, Phys. ZS. 5, 650, 1904; Verh. d. deutschen phys. Ges. 6, 234, 1904.

<sup>163</sup> O. Grottrian, Ann. d. Phys. (4) 6, 794, 1901.

<sup>164</sup> O. Grottrian, l. c. 81 i 86.

<sup>165</sup> W. König, Wied. Ann. 60, 519, 1897.

<sup>166</sup> L. Fleischmann, ZS. f. Unterr. 8, 361, 1895.

<sup>167</sup> W. König, Ann. d. Phys. (4) 2, 854, 1900.

<sup>168</sup> H. Lorberg, Ann. d. Phys. (4) 3, 522, 1900.

<sup>169</sup> Vidi napomene <sup>104a</sup> i <sup>104b</sup>.

<sup>170</sup> J. A. Vollgraff, Elektromagn. Drehungen u. unipolare Induktion, Dissert. Leiden, 1903; Ann. Beibl. 28, 198, 1904.

<sup>171</sup> F. Huth, Über die Unipolarersch., Dissert. Halle, 1902; Ann. Beibl. 28, 178, 1904.



daljinu. Lecher naprotiv naglašuje, da on strogo stoji na stanovištu Faradayevih nazora; za njega je i kod indukcije i kod rotacije putokazom načelo, da elektromotorna sila nastaje, ako vodič reže silnice<sup>172</sup>. »Nesporazum između mene i g. W. Königa izlazi po mom mišljenju iz sukoba dvaju krugova mišljenja, koji se ne daju uvijek posve složiti«<sup>173</sup>. Na taj se način Lecher ističe kao prelaz između Faradaya i novijih nazora o unipolarnoj indukciji. Druga je karakteristika svih ovih radnja, da u očima pisaca postoji uska veza između raznolikih rotacionih pokusa i unipolarne indukcije, a koja veza u prvi mah nije jasna. U tome treba bez sumnje gledati upliv Plückera. Postojanje te veze naglašuju već i naslovi Hagenbachove i treće Lecherove radnje<sup>173</sup>. Isto tako i Poincaréova radnja o unipolarnoj indukciji radi, kako mi se čini po referatu o njoj,<sup>174</sup> ponajviše o unipolarnim rotacijama. Za takve rotacije kaže čak Poincaré na drugom mjestu, da ih se katkad naziva unipolarnom indukcijom, pa kao primjer navodi Ampèreov rotacioni pokus o rotaciji magnetu oko osi.<sup>175</sup> Može se stvar shvatiti i kao tendencija, da bi se pitanje unipolarne indukcije riješilo zaobilaznim putem pomoću njezinog obrata. Tako je i de Waha svojoj eksperimentalnoj radnji, u kojoj opisuje samo različite lijepe varijante rotacionih pokusa, dao naslov »O unipolarnoj indukciji«<sup>176</sup>. I ovaj pisac stavlja svoju radnju u suprotnost s Lecherovom radnjom, ali i s Königovom i s Lorbergovom, a svoje pokuse tumači u prilog hipotezi o rotaciji silnica.

U neposrednoj vezi s prvom Lecherovom radnjom stoje dvije kratke radnje Chabota<sup>177</sup>, gdje ovaj pisac oponaša Lecherovu varijantu pokusa poznatog pod nazivom Faradayevom njihalo, i to Chabot ga izvodi DeLaRiveovim pokusom uz mogućnost vrtnje elektromagneta i Geisslerove cijevi. Međutim

<sup>172</sup> E. Lecher, Ann. d. Phys. (4) 3, 513, 1900, S. 513.

<sup>173</sup> Hagenbach, l. c. 104a: »Der elektromagn. Rotationsversuch u. die unipol. Induktion«. — Lecher, l. c. 172: »Über unipol. Induktion u. den Pohl'schen Versuch«.

<sup>174</sup> H. Poincaré, L'éclair. électr. 23, 41, 1900; »Sur l'induction unipol.«. — Vidi: Ann. Beibl. 24, 1013, 1900.

<sup>175</sup> H. Poincaré, La sc. & l'hypothèse, l. c. 93, p. 266. — Pisac pogrešno naziva taj pokus Faradayevim imenom.

<sup>176</sup> M. de Waha, ZS. f. Unterr. 14, 143, 1901.

<sup>177</sup> J. J. T. Chabot, Phys. ZS. 3, 553, 1902; 4, 189, 1903. — Vidi: Chabot, ibid., 4, 713, 1903.

su Chabotovi rezultati u objema radnjama međusobno protuslovni, jer on u prvoj radnji nalazi siguran upliv rotacije elektromagneta na grimiznu vrpcu u Geisslerovoj cijevi, a u drugoj radnji ne nalazi nikakva upliva. Chabot<sup>178</sup> je opisao i jedan demonstracijski pokus, kojim se pokazuje recipročnost unipolarne indukcije i Ampèreova rotacionog pokusa.

Kod Francuza je Raveau<sup>179</sup> podvrgnuo kritici Lecherovu radnju s gledišta elementarnih zakona. Druga radnja Raveauova dala je povoda Poincaréu<sup>180</sup>, da cijeli problem promotri s općenijeg gledišta. Premda mi sama radnja nije pristupačna, njezine glavne crte vide se iz spomenutog referata o njoj<sup>180</sup> kao i iz spomenutog poglavlja u njegovoj knjizi<sup>181</sup>. On pripisuje kod rotacija bitnu ulogu skliznim kontaktima, tako da trajna rotacija može nastati samo u krugovima, koji sadrže takve kontakte. Kod toga je radnja izvršena u jednom okretu jednaka produktu jakosti struje s indukcijom kroz krug opisan od skliznog kontakta. Za pitanje o mirovanju ili rotaciji silnica, gledano sa stanovišta i Maxwellove i Lorentzove teorije, on nalazi, da se ne da riješiti, *jer nema smisla*.

Pokus u prvoj Hoppeovoj radnji<sup>182</sup> svodi se na osnovni Faradayev pokus, gdje magnet i vanjski vodič zajedno rotiraju. Hoppe je dakako dobio negativni rezultat, pa ga on navodi kao dokaz za rotaciju silnica. Tim je upao u istu pogriješku, u koju su prije njega upali Exner i Czermak. Na tu njegovu zabludu odmah su upozorili Lecher<sup>183</sup> i Cahen<sup>184</sup>. Naknadno je na nju upozorio i Valentiner.<sup>185</sup>

Jedan od izvora nesigurnosti i kolebanja u pitanju unipolarne indukcije bila je od početka činjenica, da su sva nastojanja, da bi se elektrometrom dokazalo napetost između ekvatora i osi magneta u vrtnji, ostala bezuspješna. Danas naknadno možemo ustanoviti, da su razlozi neuspjesima bili uvijek oni isti, koje smo naveli za

<sup>178</sup> J. J. T. Chabot, Phil. Mag. (5) 47, 331, 1899.

<sup>179</sup> C. Raveau, C. R. 130, 31, 1900; L'éclair. électr. 22, 161, 1900 (Ann. Beibl. 24, 528, 705, 1900). — C. Raveau, Journ. de Phys. (3) 9, 150, 1900; vidi također: Journ. d. Phys., ibid., p. 166.

<sup>180</sup> H. Poincaré, l. c. 374.

<sup>181</sup> H. Poincaré, l. c. 93, p. 266—267, 273.

<sup>182</sup> Hoppe, l. c. 161.

<sup>183</sup> E. Lecher, Ann. d. Phys. (4) 9, 248, 1902.

<sup>184</sup> H. Cahen, Elektrot. ZS. 23, 921, 1902. — Vidi također: F. Emde, ibid., 24, 576, 1903.

<sup>185</sup> S. Valentiner, Phys. ZS. 6, 10, 1905, S. 11, Fussn. 1.



Hoppeove pokušaje iz g. 1886: s jedne strane malene elektromotorne sile, s druge strane nedovoljne osjetljivosti elektrometara. Pridolaze k tome pogreške izolacije vodova između magneta i elektrometra. Po svoj prilici imali bi se svesti na ove uzroke i nedavni neuspjeli pokušaji Crampa i Norgrova, da tu napetost dokažu dvjema metodama: direktnim mjerenjem pomoću Dolezalekova elektrometra (idiostatički) i izbijanjem kondenzatora, uklopljenog između osi i ekvatora magneta, kroz galvanometar<sup>186</sup>.

Prvi put je uspjelo dokazati elektrostatičkim putem tu napetost Grotrianu,<sup>187</sup> i to pomoću Dolezalekova elektrometra (heterostatički). Uz osjetljivost elektrometra 0,156 mV za jedan dio ljestvice on je dobivao čiste otklone — po odbitku parazitnih elektromotornih sila — oko 10 dijelova ljestvice; a to se da sa sigurnošću opažati. — Hoppe<sup>188</sup> je prigovorio ovim Grotrianovim mjerenjima, što je kod njih vod prema elektrometru stajao u direktnom dodiru s ekvatorom, a nije bio ekvatoru samo primaknut, tako da bi djelovao samo influencirani naboj. Grotrian spominje na kraju svoje radnje, da su njegovi pokušaji mjerenja uz takve prilike bili bezuspješni po svoj prilici zbog vanjskih smetnja<sup>189</sup>.

Hoppe je u spomenutoj posljednjoj radnji<sup>188</sup> pokušao dokazati na dva načina, da silnice rotiraju s magnetom. Po njemu silnice u ravnini okomitoj na os magneta položenoj kroz jedan pol nemaju radijalan izgled, ako se pilotina sipa, dok magnet rotira, već pokazuju tangencijalni pomak.<sup>190</sup> Drugi dokaz on izvodi iz svojih novih elektrometričkih mjerenja Dolezalekovim elektrometrom, bez dodirivanja magneta u ekvatoru. — Valentiner<sup>191</sup> je Hoppeov tangencijalni pomak silnica sveo na to, da njegov magnet nije bio aksijalno simetrično magnetiziran. Na tankim magnetima, točno centriranim u rotacionom aparatu, Valentiner nije dobio nikakvog tangencijalnog pomaka. Nadalje on nije čuo dokaznu snagu Hoppeovim elektrometričkim mjerenjima na osnovu načelnih

<sup>186</sup> W. Cramp a. E. H. Norgrove, Journ. Inst. Electr. Eng. 78, 481, 1936, p. 486.

<sup>187</sup> Grotrian, l. c. 163.

<sup>188</sup> Hoppe, l. c. 162.

<sup>189</sup> Grotrian, l. c., S. 816—817. — Medjutim glavni razlog bit će bio u omjeru kapaciteta. Vidi kasnije kod Swanna.

<sup>190</sup> Iz njegova se prikaza ne vidi, da li se pravac tangencijalnog pomaka mijenja sa smjerom rotacije.

<sup>191</sup> S. Valentiner, Phys. ZS. 6, 10, 1905.

prigovora. S druge strane je G a n s prigovorio<sup>192</sup>, da su glavne formule u H o p p e ovoj radnji krive. H o p p e u nije uspjelo uvjerljivo odbiti iznesene prigovore<sup>193</sup>. Napokon je kasnije B a r n e t t<sup>194</sup> mnogo točnijom metodom istražio pitanje H o p p e ova tangencijalnog pomaka silnica, pa je našao, da ni kod velikih frekvencija vrtnje magneta, koji je simetrično magnetiziran, nema unutar granica smetnja nikakvog tangencijalnog pomaka; ako ga pak ima, onda je kod njega u lučnoj mjeri bio manji od 1". — D ü s i n g o v zakret silnica<sup>194a</sup> iznad prstena, koji rotira među polovima magneta, lako se svodi na djelovanje vrtložnih struja u prstenu (L e n z o v o pravilo!).

U ovo doba izašla je i V a l e n t i n e r o v a monografija o unipolarnoj indukciji<sup>195</sup>, u kojoj je pisac kritički prikazao glavne tendencije, koje su se do tada bile ocrtale u njezinom tumačenju. V a l e n t i n e r, kao i prije njega P o i n c a r é, dolazi do zaključka, da se dilema o rotaciji ili mirovanju silnica ne da riješiti, jer nema smisla.<sup>196</sup> Slično se izražava i W. K a u f m a n n na osnovu pokusa o unipolarnoj rotaciji<sup>196a</sup>. — Medjutim E b e r t stoji potpuno na stanovištu rotacije silnica.<sup>196b</sup> —

U dosadašnjem pregledu istraživanja, koja unipolarnu indukciju promatraju s gledišta prijepora, da li silnice miruju ili rotiraju s magnetom, hotimice smo skoro posve mimoišli poglede na ovaj prijepor sa stanovišta M a x w e l l o v e teorije. Iznimku smo učinili kod spomenute P o i n c a r é o v e radnje, kojoj je osnova M a x w e l l o v a teorija. I V o l l g r a f f je u svojoj dizertaciji djelomično dodirnuo M a x w e l l o v u i H e r t z o v u teoriju. — Tim smo preskočili jedan odlomak razvoja ovog prijepora, jer je on već skoro decenij ranije došao u dodir s M a x w e l l o v o m teorijom, pa je u nastavku dodirnuo i teorije, koje su se razvile iz nje.

<sup>192</sup> R. G a n s, Ann. Beibl. 29, 966, 1905.

<sup>193</sup> Edm. H o p p e, Phys. ZS. 6, 340, 1905. — Vidi također: R. H. W e b e r, ibid., 6, 143, 1905.

<sup>194</sup> S. J. B a r n e t t, Phil. Mag. (6) 26, 987, 1913.

<sup>194a</sup> K. D ü s i n g, Ann. d. Phys. (4) 12, 1158, 1903.

<sup>195</sup> S. V a l e n t i n e r, Die elektromagn. Rotation u. die unipolare Induktion, Karlsruhe 1904. Knjižica mi nije dostupna. Vidi također: Ann. Beibl. 28, 1063, 1904; S. V a l e n t i n e r, l. c. <sup>191</sup>, S. 12; R. H. W e b e r, l. c. <sup>193</sup>.

<sup>196</sup> Vidi također: l. c. <sup>191</sup>, S. 12.

<sup>196a</sup> W. K a u f m a n n, Magnet. u. Elektr. (Müller-Pouillet's Lehrb. d. Phys., 10. izd., sv. IV/2—3, Braunschweig 1914, S. 677—678, 757.

<sup>196b</sup> H. E b e r t, Magn. Kraftfelder, 2. izd., Leipzig 1905, S. 238—241.



Hertzova teorija indukcije u tjelesima u gibanju (1892.) počiva na pretpostavci, da su silnice vezane uz materiju, pa da ih ona povlači za sobom<sup>197</sup>. W. Wien je posvetio opsežnu radnju gibanju silnica u dielektricima<sup>198</sup>. Kod njega silnice, električke i magnetske, imaju značaj stalnosti, pa promjene elektromagnetskog polja nastaju neprekidnim pomicanjem silnica. Ako ove zamišljamo vezanima uz jedan substrat, onda se njihova pomicanja sastoje u neprekidnom gibanju toga substrata, koje za sobom povlači silnice. One, kao i kod Hertza, teku paralelno s polarizacijama, a može ih se zamišljati kao izvjesna stanja, koja prelaze s jedne čestice na drugu ili kao nepromjenljiva stanja vezana uz dijelove substrata. A nema ni razloga pretpostavci, da bi se gibanje silnica u tjelesima u gibanju imalo fizikalno razlikovati od gibanja, kakvo mi zamišljamo pod gibanjem elektromagnetskog polja, tako da Faradayevi nazori o samostalnom gibanju nepromjenljivih silnica ispravno prikazuju pojave.<sup>199</sup> — I. R. H. Weber smatra gibanje silnica — slikovito shvaćenih — značajnom crtom svih oblika struje i podlogom Maxwell-Hertzove teorije.<sup>199a</sup>

Föppl se u pitanju unipolarne indukcije<sup>200</sup> potpuno postavio na Prestonovo stanovište. Rotacija se magneta po njemu jedva razlikuje od translacije, pa zato i kod rotacije sudjeluju silnice u rotaciji tijela, tako da »moramo uzeti, da sve silnice i indukcijone linije, i to zajedno s njihovim nastavkom u zraku, rotiraju s magnetom«<sup>201</sup>. Pomisao, da bi ove crte u magnetu rotirale zajedno s njim, a da bi u okolnom zraku mirovale, tako da bi površina magneta bila za njih sklizna ploha, protivi se samoj činjenici unipolarne indukcije; jer bi u tom slučaju unipolarna indukcija kod rotacije magneta bila nemoguća<sup>201</sup>. On uvida, da bi u slučaju mirovanja silnica inducirana elektromotorna sila u magnetu imala radialnu raspodjelu; ali tu misao napušta posve obzirom na spomenutu sličnost između translacije i rotacije<sup>202</sup>. — Međutim već u drugom

<sup>197</sup> W. Wien, l. c. <sup>198</sup>, S. 332. — H. A. Lorentz, l. c. <sup>59</sup>, S. 119. — Vidi naprotiv: S. J. Barnett, l. c. <sup>223</sup>, p. 251, gdje pisac tvrdi, da ni Hertzova teorija ne čini nikakve pretpostavke glede gibanja silnica.

<sup>198</sup> W. Wien, Wied. Ann. 47, 327, 1892.

<sup>199</sup> Wien, ibid., S. 329, 332, 338, 344.

<sup>199a</sup> R. H. Weber, Verh. Nat.-Med. Ver. Heidelberg, N. F. 7, 623, 1903.

<sup>200</sup> A. Föppl, Einführung i. d. Maxwell'sche Theorie d. Elektrizität, Leipzig 1894, § 121, S. 327—330.

<sup>201</sup> Föppl, ibid., S. 329. — Föppl zamišlja gibanje silnica kao pomoćnu sliku (»bildlich gesprochen«, S. 328).

<sup>202</sup> Föppl, ibid., S. 328—329.

izdanju<sup>203</sup> Föpplove knjige Abraham se protivi formulaciji pitanja o rotaciji ili mirovanju silnica obzirom na to, da su indukcijone linije samo geometrijsko sredstvo za prikazivanje magnetskog polja, tako da pojam »gibanja indukcijonih linija« lebdi u zraku<sup>204</sup>; dakle Abraham uzima stanovište slično Poincaréovom. Premda on neće da zalazi u pitanje o tome, gdje je sjedište inducirane elektromotorne sile, ako magnet rotira, njegovo izvođenje formule za induciranu elektromotornu silu, primjenom II. Hertzeve jednadžbe za tjelesa u gibanju, ipak počiva na pretpostavci, da magnetski tok u magnetu miruje. Za ovo izvođenje formule nalazi, da je ono u skladu i s Lorentzovom teorijom elektrona.<sup>205</sup>

Szarvassi<sup>206</sup> obrađujući kao analogon Rowlandovu pokusu problem elektrizirane vodljive kugle, koja rotira, izvodi iz Hertzevih pretpostavki, da bi po Hertzu silnice u takvom rotirajućem tijelu trebale rotirati s tijelom, a u okolnom mediju mirovati. On pokazuje, da to vodi do protuslovlja u pogledu graničnih uslova. Nalazi, da je problem lako riješiv uz modifikaciju Hertzeve teorije pretpostavkom, da silnice u tijelu, koje rotira, i izvan tijela rotiraju s njim. — Međutim je kasnije sam pisac opozvao svoje zaključke u drugoj radnji, o kojoj će biti govora.<sup>207</sup>

U ovo doba pada jedna poveća teoretska radnja Vollgraffa<sup>208</sup>, koja mi doduše nije dostupna, ali je njezina glavna misao iznesena u Lorentzovoj primjedbi na nju<sup>209</sup>. Promatrajući unipolarnu indukciju s gledišta mirovanja etera kao analogiju pokusima Röntgena i Eichenwalda, Vollgraff razmatra mogućnost, da li i kod unipolarne indukcije treba vektor magnetske indukcije rastaviti u dvije komponente, od kojih bi samo jedna, koja je tako reći vezana uz tvar, inducirala elektromotornu silu. Kod toga pisac nailazi na teoretske poteškoće. Lorentz naprotiv dolazi do zaključka, da kod unipolarne indukcije cijela magnetska indukcija inducira elektromotornu silu. — Lorentz se na drugom mjestu pobliže bavio pitanjem mirovanja ili gibanja

<sup>203</sup> M. Abraham u. A. Föppl, *Theorie d. Elektrizität*, II. izd., Leipzig 1904, Bd. I, § 87, S. 405—409.

<sup>204</sup> Abraham u. Föppl, *ibid.*, S. 407—408.

<sup>205</sup> Abraham, *Theorie d. Elektrizität*, Bd. II., Leipzig 1905, S. 322.

<sup>206</sup> A. Szarvassi, *Wiener Ber.* III, 1053, 1902.

<sup>207</sup> A. Szarvassi, *l. c.* <sup>204</sup>, S. 79—80.

<sup>208</sup> J. A. Vollgraff, *Arch. néerl.* (2) 9, 340, 1904.

<sup>209</sup> H. A. Lorentz, *ibid.* 9, 380, 1904; *Coll. Papers*, vol. III, p. 177.



silnica, pa za slučaj aksijalne simetrije tijela i polja dolazi do zaključka, da su oba shvaćanja ravnopravna<sup>209a</sup>.

S razvojem L o r e n t z ove teorije došlo je pitanje unipolarne indukcije, uvijek gledano s gledišta prijepora o mirovanju ili o rotaciji silnica, uskoro u vezu s pokusima od B l o n d l o t a i od W i l s o n a i s pitanjem o zavlacenju etera, a u manjoj mjeri i s E i n s t e i n ovim principom relativnosti.

U ovo područje pripada i teoretska radnja R. H. W e b e r a,<sup>209b</sup> u kojoj pisac primjenom L o r e n t z ove sile na relativno gibanje silnica prema materiji dokazuje najprije ispravnost stano-  
višta zastupanog od P o i n c a r é a i od V a l e n t i n e r a o bezna-  
čajnosti spora o rotaciji ili mirovanju silnica. Nadalje on dokazuje, da se za slučaj mirovanja silnica stvara na površini vodljivog magneta naboj, koji uprav kompenzira polje u unutrašnjosti, a izaziva u vanjskom prostoru polje, koje je uprav jednako polju, koje bi iza-  
zvale silnice svojom rotacijom s magnetom.

B a u m g a r d t<sup>210</sup> ustanovljuje, da bi i po H e r t z ovoj i po L o r e n t z ovoj teoriji<sup>211</sup>, kao i po J a u m a n n ovoj deforma-  
cijonoj teoriji, na magnetu, koji rotira, trebale nastati električne  
napetosti posve nezavisno o pitanju, da li magnetsko polje miruje  
ili rotira. Zbog toga elektrostatička mjerenja o naboju na magnetu  
ne bi mogla dati odgovora na pitanje o mirovanju ili rotaciji silnica.  
Međutim poslije W i l s o n ova pokusa stvar stoji po mišljenju  
B a u m g a r d t a drukčije, jer da je tim pokusom dokazana za-  
visnost inducirane elektromotorne sile o konstanti dielektričnosti.  
Ako rotacija jednog izoliranog cilindričkog magneta upliva na na-  
petost među oblozima šupljeg dielektričkog valjka, koji ga opko-  
ljuje, a rotira nezavisno o magnetu, znači, da rotacija magneta iza-  
ziva takve promjene stanja u okolnom sredstvu, kroz koje prolaze  
silnice<sup>212</sup>, kakve promjene djeluju elektromotorno. U protivnom  
slučaju značilo bi, da »silnice miruju«. — B a r n e t t<sup>213</sup>, koji je  
W i l s o n o v pokus ponovio u većem opsegu s različitim dielektri-

<sup>209a</sup> H. A. Lorentz, l. c. 50, S. 121—122.

<sup>209b</sup> R. H. Weber, Verh. Nat.-Med. Ver. Heidelberg, N. F. 8, 331, 1906.

<sup>210</sup> L. Baumgardt, Ann. d. Phys. (4) 23, 986, 1907.

<sup>211</sup> Obje po Abrahamu, l. c. 203.

<sup>212</sup> Da bi izbjegao izraz »silnice rotiraju«, koji je već onda bio omražen, Baumgardt upotrebljava ovakav način izražavanja, koji je vjerojatno pre-  
uzeo od Wiena, l. c.

<sup>213</sup> S. J. Barnett, Ann. d. Phys. (4) 30, 416, 1907.

cima<sup>214</sup>, protivi se mogućnosti rješenja ovog prijepora pokusima, koje je predložio Baumgardt, jer da ni Blondlotov ni Wilsonov pokus nijesu pokazali zavisnosti inducirane elektromotorne sile o konstanti dielektričnosti, a takve ne daje ni Lorentzova teorija.

Ovamo pripada i kratka bilješka od Vollgraffa<sup>215</sup> o pitanju, ima li se problem dielektrika, koji rotira, promatrati s gledišta Lorentzove teorije ili Einsteinove teorije relativnosti.

Tako je unipolarna indukcija u vezi s prijeporom o rotaciji ili mirovanju silnica postepeno došla u red onih pokusa, kojima se tražila odluka između Hertzove i Lorentzove teorije. Došla su eksperimentalna istraživanja od Kennarda i Barnetta, kojima su oba pisca usprkos potpune sličnosti njihovih pokusa dali posve različita tumačenja. U taj je prijepor ušao Fehrle, bavio se njim Pegram, a dodirnuo ga je i Swann, pa se tako ovaj novi prijepor protegnuo sve do godine 1924. (Lawrence). Nažalost mi veći dio radnja iz ovog razdoblja, koje su izašle u američkim i engleskim časopisima za vrijeme prvog svjetskog rata i u prvim godinama poslije njega, nije dostupan. Od Swannovih radnja mogao sam doći samo do njegove eksperimentalne radnje i do njegove elektrodinamike tjelesa u gibanju<sup>216</sup>, a druge su mi dostupne samo po referatima. Pegramova radnja<sup>216a</sup> dostupna mi je samo po prikazu, koji je o njoj dao Tate u svojoj radnji o unipolarnoj indukciji<sup>217</sup>.

Sve eksperimentalne radnje iz ovog razdoblja imaju zajedničku značajnu crtu u tome, što rade s otvorenim električkim krugovima u toliko, što se mjerenja izvode elektrometrom. U radnjama Barnetta i Fehrlea, kao i u radnji Kennarda iz g. 1917. značajno je i to, što su njihove aparature posve bez željeza, pa odgovaraju širem pojmu unipolarne indukcije po Faradayu i po Nobiliu. Bit će da u tome treba gledati ne samo upliv Wilsonova pokusa i Lorentzove teorije elektrona nego i upliv spomenute Lorentzove definicije unipolarne indukcije.

<sup>214</sup> S. J. Barnett, Phys. Rev. (1) 27, 425, 1908.

<sup>215</sup> J. A. Vollgraff, Ann. d. Phys. (4) 27, 229, 1908.

<sup>216</sup> W. F. G. Swann, Bull. Nat. Res. Council. 4, 1—74, 1922 (Electrodyn. of Moving Media, I).

<sup>216a</sup> G. B. Pegram, Phys. Rev. (2) 10, 591, 1917. — Tate, l. c. 217, p. 82, 91—92.

<sup>217</sup> J. T. Tate, Bull. Nat. Res. Council. 4, 75—95, 1922 (Electrodyn. of Moving Media, II).



Kennardova<sup>218</sup> aparatura sastoji od cilindričkog elektromagneta, koji rotira u jednom izoliranom kovnom cilindru, a ovaj je spojen s elektrometrom. Između elektromagneta i ovog cilindra nalazi se drugi kovni cilindar, spojen sa zemljom, kao elektrostatička zaštita. Kennard postavlja pitanje, hoće li izolirani cilindar dobiti naboj ili ne, ako samo elektromagnet rotira. Ako silnice rotiraju, indukcija nastaje u izoliranom cilindru i u vodu elektrometra, pa će ovaj pokazati otklon. Ako pak silnice miruju, nastaje naboj u magnetu; vanjski cilindar pak je od njega elektrostatički zaštićen, pa elektrometar neće pokazati otklona. Srednje vrijednosti otklona u nizovima mjerenja, koje je izveo Kennard, daju nulu, dok bi otklon uz pretpostavku rotacije silnica trebao iznositi 31 do 37 dijelova. Odatle Kennard zaključuje, da hipoteza rotacije silnica ne valja. On zaključuje odatle kao vjerojatno i to, da indukcija gibanjem zavisi o apsolutnom gibanju, t. j. o gibanju prema eteru, koji po Lorentzu miruje.

Barnettova<sup>219</sup> aparatura sastoji od cilindričkog kondenzatora, oko kojeg može rotirati koaksijalno uzvojnica, koja stvara magnetno polje. Ova je namotana na mesinganom cilindru. Kondenzator je spojen s elektrometrom. Dok uzvojnica rotira, oblozi kondenzatora su kratko spojeni komadom žice.<sup>220</sup> Barnett ispituje, hoće li elektrometar pokazati otklon, kad se prekine kratki spoj kondenzatora. Rezultat je negativan. Obrnuti pokus: da kondenzator rotira, a uzvojnica miruje, on ne izvodi, jer je taj pokus već davno učinio Faraday. Barnett naglašuje, da se iz ovog negativnog rezultata ne da izvesti nikakav zaključak ni za ni protiv u prijedoru o rotaciji ili mirovanju silnica. On u opće poriče, da bi odluku u ovom prijedoru mogli donijeti ikakvi pokusi s otvorenim krugovima. Jer ako silnice rotiraju, moraju se uzeti u obzir elektromotorne sile, koje bi se onda prema Wilsonovu pokusu radjale u okolnom dielektriku, pa se lako pokazuje, da je u svakoj točki električka gustoća po jednoj i po drugoj hipotezi u svakom slučaju točno ista. Dakle po hipotezi o rotaciji silnica kondenzator u nje-

<sup>218</sup> E. H. Kennard, Phil. Mag. (6) 23, 937, 1912.

<sup>219</sup> S. J. Barnett, Phys. ZS. 13, 803, 1912; Phys. Rev. (1) 35, 323, 1912.

<sup>220</sup> Prema tome Barnettov pokus u svojim osnovnim crtama odgovara jednom od pokusa, koje je zamislio i diskutirao Preston. Vidi napomenu <sup>114</sup>. Kennardov pokus bliži je Prestonovu pokusu s magnetom i kovnom ljuskom, koja ga opkoljuje. Negativni rezultat jednog i drugog pokusa odgovara negativnom rezultatu Faradayeve pokusa iz Dnevnika, § 257.

govu pokusu ne dobiva naboja, jer je ukupna elektromotorna sila u krugu, koji se sastoji od kratko spojenog kondenzatora i bilo koje krivulje kroz dielektrik, jednaka nuli. Još manje pak može biti naboja po hipotezi o mirovanju silnica. Zbog toga on poriče opravdanost zaključku, koji je Kennard izveo iz negativnog rezultata svog pokusa. Naprotiv negativni rezultat jednog i drugog pokusa po njegovu mišljenju govori protiv mogućnosti primjene načela o relativnosti gibanja na pojav unipolarne indukcije. Uprav u tome vidi on važnost svog pokusa. Jer ako se kondenzator vrti, a uzvojnica miruje, kondenzator se nabija; dok nema naboja, ako kondenzator miruje, a uzvojnica se vrti, premda su u oba slučaja relativna gibanja ista.

U diskusiji, koja se razvila, Kennard<sup>221</sup> poriče ispravnost Barnettova zaključka glede relativnosti gibanja, jer bi u slučaju, kad bi Barnettov kondenzator rotirao, morao rotirati i zrak u njemu, da bi bila ispunjena ekvivalencija gibanja. Kad bi pak to bilo, onda se prema samim Barnettovim razlozima ne bi smio kondenzator nabiti ni u tom slučaju. On nalazi, da ni po Hertzovoj ni po Lorentzovoj teoriji na razvijene naboje ne može uplivati okolni dielektrik, nego naboji u sustavu, koji se vrti, zavise o elektromotornoj sili razvijenoj u vodičima. Dosljedno tome on drži, da i Barnettov negativni rezultat govori protiv hipoteze o rotaciji silnica. Ovo razlaganje on dopunjuje u novoj radnji<sup>222</sup> dokazom ovog općenitog stavka: ako jedan čvrsti sustav, koji sastoji od vodiča i od jednog homogenog dielektrika opkoljenog vodljivom plohom, rotira oko jedne magnetske osi simetrije ili ako ga režu magnetske silnice u rotaciji, onda je svaka raspodjela električnog naboja, koji bi možda nastao, nezavisna o konstanti dielektričnosti. Odatle on zaključuje, da u njegovom pokusu negativni rezultat u najmanju ruku nije mogao biti uvjetovan uplivom dielektrika. — Barnett u svom osvrtu<sup>223</sup> odbacuje Kennardov prigovor u pogledu gibanja zraka ukazujući na Blondlotov pokus. Wilsonovi pokusi su pokazali, da se kondenzator u rotaciji nabija i bez kratkog spoja, ako dielektrik među oblozima rotira. Ako je kondenzator kratko spojen, pa i kratki spoj rotira, naboj je isti, kao da je među oblozima samo eter. Elektromotorna

<sup>221</sup> E. H. Kennard, Phys. ZS. 13, 1155, 1912.

<sup>222</sup> E. H. Kennard, Phys. ZS. 14, 250, 1913.

<sup>223</sup> S. J. Barnett, Phys. ZS. 14, 251, 1913.



sila u oba slučaja je ista. Osim spomenutog Kennardova stavka, koji se posve slaže s Barnettovim gledištem, stanovišta obaju pisaca nijesu se približila ni u nastavku diskusije<sup>224</sup>, jer obojica drukčije gledaju na Hertzovu i na Lorentzovu teoriju. Graetz<sup>225</sup> se u pogledu tumačenja obaju pokušava slaže s Barnettovim stanovištem, ali ne odobrava njegova zaključka o relativnosti gibanja oslanjajući se na Fehrleove pokuse. — Kennard se i u svojoj radnji iz g. 1917. protivi Barnettovu stanovištu.

Fehrleov aparat<sup>226</sup> sliči Barnettovom; samo mjesto cilindričkog kondenzatora kod njega dolazi šuplji mesingani cilindar. Ovaj je blizu svoje ekvatorijalne ravnine zatvoren mesinganom pločom, koja nosi rotaciju os. Nadalje kod njega mogu nezavisno rotirati i taj cilindar i uzvojnica, koja je namotana na cilindričkoj cijevi od mesinga, koja ujedno služi kao elektrostatička zaštita. Osim pitanja primjenljivosti načela relativnosti gibanja, za koje nalazi, da je potpuno očuvano, on istražuje i upliv gibanja dielektrika, uzimajući, da je taj mjerodavni dielektrik zrak. Nalazi: 1. da cilindar dobiva električki naboj, ako on rotira, a zrak u njemu miruje; 2. ako i zrak u cilindru rotira, cilindar u rotaciji ne dobiva naboja; 3. ako uzvojnica sa svojom cilindričkom cijevlju rotira, cilindar dobiva naboj, koji je dva puta veći od onoga, koji nastaje, ako sam cilindar rotira. Pisac nastoji dokazati, da ovaj posljednji naboj nije nastao indukcijom, bilo da se uzme, da silnice rotiraju ili da one miruju, nego da je mogao nastati samo influencijom naboja iz mesingane cijevi.

Pojava dvostrukog naboja u ovom trećem slučaju nije u radnji dovoljno objašnjena. Barnett<sup>227</sup>, koji se u povećoj bilješci osvrnuo na ove Fehrleove rezultate, nalazi, da u drugom slučaju rotacije cilindra zrak nije mogao imati upliva, koji mu pripisuje Fehrle, jer je mirovanje ili gibanje zraka u oba slučaja određeno prilično samovoljno. S druge strane takav upliv stoji u suprotnosti s negativnim rezultatom Blondlotova pokusa. Naravno pak ukazuje Barnett na ogromno rasipanje vrijednosti

<sup>224</sup> E. H. Kennard, Phys. Rev. (2) 1, 355, 1913. — S. J. Barnett, Phys. Rev. (2) 2, 323, 1913.

<sup>225</sup> L. Graetz, Handb. d. Elektr. u. d. Magnet, Bd. V, Leipzig 1928, S. 26.

<sup>226</sup> K. Fehrle, Ann. d. Phys. (4) 42, 1109, 1913.

<sup>227</sup> S. J. Barnett, Ann. d. Phys. (4) 45, 1253, 1914.

u F e h r l e ovim mjerenjima, pa zaključuje, da se iz takvih mjerenja ne da izvesti nikakav pouzdani zaključak. Ovaj B a r n e t t ov prigovor je zaista opravdan. U F e h r l e ovoj tablici A II, 1 pojedinačna opažanja otklona elektrometra u jednom nizu mjerenja (polje uzvojnice  $\rightarrow$ ) kolcbaju između  $+ 2,1$  i  $+ 10,7$ , a u idućem nizu (polje uzvojnice  $\leftarrow$ ) čak između  $+ 7,1$  i  $- 8,1$ . U tablici B I, 1, iz koje F e h r l e izvodi spomenuti treći rezultat, pojedinačna opažanja kolcbaju u jednom nizu (polje uzvojnice  $\rightarrow$ ) između  $- 9,0$  i  $- 0,5$ , a u idućem nizu (polje uzvojnice  $\leftarrow$ ) između  $+ 8,6$  i  $- 0,8$ . Sa svim tim on iz tako nesuvislih opažanja uzima aritmetičke sredine i izvodi kvantitativne zaključke. Može se slutiti, da je on u svojoj aparaturi imao jednu nestalnu elektrostatičku smetnju, koje nije zapazio.

K e n n a r d<sup>228</sup> je izveo još jedan pokus, kod kojega eksperimentalni uređaj posve odgovara B a r n e t t ovom, samo s tom razlikom, da kod K e n n a r d a može rotirati i cilindrički kondenzator, kao i uzvojnica i kondenzator istodobno. Osjetljivost elektrometra iznosila je do  $5 \cdot 10^{-5}$  volta. Kondenzator se nabio, ako je on rotirao zajedno s uzvojnicom, dok rotacija same uzvojnice nije proizvodila na njemu nikakva naboja. Ovaj rezultat on i ovdje tumači kao dokaz protiv hipoteze o rotaciji silnica. Nadalje zaključuje, da elektromagnetska indukcija djelomično zavisi o apsolutnoj rotaciji, pa u tome nalazi na osnovu L o r e n t z ove teorije, kao i prije, podlogu za apsolutno mirovanje etera. Napose ističe, da je po njegovom mišljenju tvrdnja P o i n c a r é a, A b r a h a m a i B a r n e t t a, da se ni na otvorenim krugovima ne da donijeti odluka između vrtnje i mirovanja silnica, kriva. — Iste je godine izašla i spomenuta P e g r a m o v a radnja, koja mi je dostupna samo po podacima kod drugih pisaca. Njegova aparatura prema podacima, koje nalazim kod T a t c a, u glavnom odgovara ovoj posljednjoj K e n n a r d ovoj aparaturi. I kod njega mogu rotirati i uzvojnica i cilindrički kondenzator istodobno. U ovom slučaju on dobiva isti naboj, kao da rotira samo cilindrički kondenzator. Ako pak rotira sama uzvojnica, ni on ne dobiva nikakvog naboja na kondenzatoru kao ni K e n n a r d.

Međutim je zanimivo, da se K e n n a r d ov negativni rezultat za slučaj, kad je rotirala sama uzvojnica, strogo uzimajući ne može uzeti kao eksperimentalni dokaz protiv spomenutog trećeg rezultata

<sup>228</sup> E. H. Kennard, Phil. Mag. (6) 33, 179, 1917.



Fehrle ovog, jer je kod Kennarda vanjski cilindar kondenzatora bio spojen sa zemljom, pa on po Swannu djeluje kao elektrostatički zastor za unutrašnji cilindar<sup>228a</sup>. Da li je tako bilo i kod Pegram a, o tom ne nalazim podataka. S druge strane već je Pegram dokazivao<sup>228b</sup> — a u tom se s njim slaže i Swannova teorija<sup>228b</sup> — da rotacija solenoida ili u opće cirkularne struje oko simetrične osi okomite na ravninu uzvoja ne proizvodi nikakvog dodatnog magnetičkog ni električkog polja. U tom pogledu dakle nije uzvojnica ekvivalentna magnetu. U Fehrleovu slučaju moglo je kod vrtnje uzvojnice doći do izvjesne neznatne indukcije samo u mesinganoj cijevi, na kojoj je uzvojnica bila namotana. Obzirom na sve to, kao i na okolnost, da Fehrle ničim ne obrazlaže pojavljivanje dvostrukog naboja u spomenutom njegovom trećem slučaju, a povrh svega je postanak naboja u tom slučaju i nevjerojatan i stoji u suprotnosti sa svim istraživanjima počevši od Faradaya a, smije se taj Fehrleov rezultat konačno zabaciti.

Nijesu mi dostupne ni jedna nešto starija Kennardova radnja iz g. 1916.<sup>229</sup> ni Barnettova radnja iz g. 1918.,<sup>230</sup> u kojoj je pisac kušao eksperimentalno riješiti pitanje, da li eter postoji ili ne.

Swann i njegovi suradnici su teoretskom i eksperimentalnom istraživanju unipolarne indukcije posvetili cijeli niz radnja.<sup>231</sup> Zapravo bi pregled ovih radnja trebalo dati u idućem odsječku, jer se Swannova teorija posve temelji na Maxwelllovoj elektromagnetskoj teoriji i na Lorentzovoj teoriji elektrona. Ali on svoju teoriju unipolarne indukcije izričito dovodi u vezu s hipotezom o rotaciji silnica, jer on hoće da pokaže, kako se ta hipoteza ima interpretirati, da bi došla u sklad s Maxwelllovom teorijom<sup>232</sup>.

<sup>228a</sup> Vidi napomenu <sup>234</sup> i tekst, na koji se ona odnosi.

<sup>228b</sup> Tate, l. c. <sup>217</sup>, p. 82, 92.

<sup>229</sup> E. H. Kennard, Phys. Rev. (2) 7, 399, 1916. — Literaturni podatak prema Valentineru, l. c. <sup>6</sup>, S. 355, Fussn. 4.

<sup>230</sup> S. J. Barnett, Phys. Rev. (2) 12, 85, 1918. — Vidi i: Tate, l. c. <sup>217</sup>, p. 90—91.

<sup>231</sup> W. F. G. Swann, Phys. Rev. (2) 19, 38, 1922. — Ostale njegove radnje dostupne su mi samo u referatima. To su ove radnje: Phys. Rev. (2) 14, 537, 1919 (Phys. Ber. 1, 1502, 1920); Phys. Rev. (2) 15, 137, 1920 (Phys. Ber. 2, 208, 1921); Phys. Rev. (2) 15, 227, 1920 (Phys. Ber. 2, 404, 1921; Journ. de phys. (6) 1 D, 128 D, 1920); Phys. Rev. (2) 15, 365, 1920 (Phys. Ber. 1, 1503, 1920); Phys. Rev. (2) 17, 423, 1921 (Phys. Ber. 2, 891, 1921). Vidi i napomenu <sup>233</sup>. Najbolje podatke nalazim kod Tatea. Za Rognleya i za Lawrence a vidi napomene <sup>237</sup> i <sup>238</sup>.

<sup>232</sup> Swann, Phys. Rev. (2) 19, 38, 1922, p. 38.

S w a n n postavlja vezu svoje teorije s ovom hipotezom tim, što on polazi od unutrašnje strukture magneta, i to od teorije elementarnih magneta u A m p è r e o v u obliku. Po njemu se problem unipolarne indukcije konačno reducira na djelovanje translacije kružnih struja, kakve su A m p è r e o v i elementarni vrtlozi, na električne naboje u njihovoj okolini. Električna sila, koja kod toga nastaje, sastoji se od vremenske derivacije M a x w e l l o v a vektor-potencijala, gradijenta skalarnog potencijala i L o r e n t z o v e sile. Zbog toga dolazi do novog rasporeda naboja u vrtlogu tako, da preostaje L o r e n t z o v a sila  $-\frac{[vB]}{c}$ , koja djeluje na mirujući naboj u okolini ( $v =$  brzina translacije). Sama vrtnja elementarnog vrtloga oko vlastite osi ne proizvodi nikakvog djelovanja. Kod vrtnje jednog magnetiziranog tijela, koje ne bi bilo vodič, translacija magnetičkih čestica radala bi električnu polarizaciju okomito na os vrtnje. U normalnom magnetu kao vodiču ta bi polarizacija proizvela takav raspored naboja, da bi posve bilo poništeno električno polje u unutrašnjosti i u okolini. Međutim zbog toga, što se tvar magneta giba u svom vlastitom magnetnom polju, djeluje L o r e n t z o v a sila, koja poremeti raspodjelu naboja tako, da dođe do stvaranja razlike potencijala u magnetu između osi i površine. Ako je os spojena sa zemljom, stvara se na površini naboj, a u okolini magneta nastaje električno polje. Opkolimo li dakle magnet, koji se vrti, izoliranim koynim obvojem, koji ne rotira, ovaj će se obvoj nabiti influencijom. Napetost, koju kod toga pokazuje elektrometar, zavisi o omjeru kapaciteta magneta prema kapacitetu kovnog obvoja zajedno s elektrometrom. S w a n n nalazi, da je njegova teorija u skladu s teorijom relativnosti do brzina, kod kojih  $\left(\frac{v}{c}\right)^2$  ne bi bilo zanemarljivo.

Gibanje elementarnih vrtloga je jedini ustupak, koji S w a n n čini hipotezi o rotaciji silnica. Jer silnica on zapravo ni ne pretpostavlja izričito; elementarni vrtlozi su za njega samo izvori magnetizma. Za njega se kovna ljuska, koja u pokusu opkoljuje magnet, ne nabija primarnim djelovanjem indukcije nego elektrostatskom influencijom naboja na magnetu; dakle za njega ne može biti govora o rotaciji silnica izvan magneta. Prema tome se njegova teorija ne smije ubrojiti među teorije, koje počivaju na hipotezi o rotaciji silnica. U najgorem slučaju moglo bi se reći, da ona stoji po sredini između obiju hipoteza, one o rotaciji i one o mirovanju silnica.



Ako je magnet, koji rotira, opkoljen uzemljenim kovnim dijelovima, ovi djeluju kao elektrostatička zaštita, pa izvan te zaštite nema spomenutog elektrostatičkog djelovanja magneta. Zato je S w a n n porekao<sup>233</sup> dokaznu snagu spomenutom posljednjem B a r n e t t ovom pokusu, jer je kod ovog pokusa kondenzator, koji se trebao nabiti djelovanjem elektromagneta, koji se njihao, nalazio u kovnoj kutiji, koja je bila spojena sa zemljom.<sup>234</sup> Kasnije je i sam B a r n e t t posumnjao u ispravnost svoje eksperimentalne pretpostavke.<sup>235</sup>

S w a n n je eksperimentalno ispitao<sup>236</sup> svoju teoriju na željeznoj kugli polumjera 3,17 cm, koja je rotirala oko osi simetrije magnetnog polja, a bila je opkoljena izoliranom bakrenom kuglom, dok joj je osovina bila spojena sa zemljom. Mjerenja napetosti na bakrenoj kugli dala su dobro slaganje s izračunanim vrijednostima. To je prvi eksperimentalni dokaz električnog polja oko magneta u rotaciji. R o g n l e y<sup>237</sup> je S w a n n ovu teoriju računski primijenio na željezni rotacioni elipsoid, koji je magnetiziran u pravcu svoje osi simetrije, koja je os vrtnje i u zamišljenom pokusu, te na dugi željezni cilindar promatran približno kao rotacioni elipsoid. L a w r e n c e<sup>238</sup> je R o g n l e y ev račun za elipsoid eksperimentalno ispitao. L a w r e n c e ov uređaj sastoji od čeličnog elipsoida, koji je opkoljen izoliranim mesinganim cilindrom, a oko svega dolazi kao elektrostatička zaštita prema okolini mesingana cijev, na kojoj je namotana uzvojnica za magnetiziranje elipsoida.<sup>238a</sup>

<sup>233</sup> W. F. G. S w a n n, Phys. Rev. (2) 17, 242, 1921 (Phys. Ber. 2, 661, 1921; Journ. de phys. (6) 4 D, 884 D, 1923); Phil. Mag. (6) 45, 1191, 1923. Vidi i T a t e, l. c., p. 91.

<sup>234</sup> T a t e, ibid. — Ovaj S w a n n ov prigovor treba isto tako primijeniti na prvi K e n n a r d o v pokus. Ovdje se između elektromagneta, koji je rotirao, i izoliranog cilindra, kojega je napetost mjerena, nalazila posebna kovna cijev spojena sa zemljom u svrhu elektrostatičke zaštite cilindra prema napetosti struje u uzvojnici elektromagneta. Međutim njom je bila spriječena i influencija od induciranog naboja na jezgri elektromagneta. — Naknadno sam dobio snimku R o g n l e y eve radnje (l. c. <sup>237</sup>), pa vidim, da je već on ovo zapazio, a proširio je istu zamjerku i na B a r n e t t ovu radnju iz g. 1912.

<sup>235</sup> S. J. B a r n e t t, Phys. Rev. (2) 15, 527, 1920 (Phys. Ber. 2, 48, 1921; Journ. de phys. (6) 2 D, 5 D, 1921). Vidi i: T a t e, l. c., p. 91.

<sup>236</sup> S w a n n, l. c. <sup>232</sup>, dotično prva u <sup>231</sup>.

<sup>237</sup> O. R o g n l e y, Phys. Rev. (2) 19, 609, 1922.

<sup>238</sup> E. L a w r e n c e, Phil. Mag. (6) 47, 842, 1924.

<sup>238a</sup> U svrhu usporedbe potrebno je pripomenuti, da taj uređaj u svojim osnovnim crtama odgovara uređaju prvog K e n n a r d o v a pokusa, kad se K e n n a r d o v izolirani cilindar premjesti na mjesto njegove uzemljene kovne cijevi.

Napetost na izoliranom cilindru mjeri se Dolezalekovim elektrometrom. Rezultati mjerenja dobro se slažu s Rognleyevom formulom, ako se u nju uvede cijeli magnetski tok elipsoida, t. j. onaj koji dolazi od njegove magnetizacije i onaj koji bi dolazio od prvobitnog magnetskog polja uzvojnice. Kad bi se uzelo s gledišta hipoteze o rotaciji silnica, da magnetske silnice samog elipsoida rotiraju zajedno s njim i ne izvide nikakvog efekta na magnetu, nego da cijeli efekt izvode magnetske silnice prvobitnog polja uzvojnice (*»the external field«*), dobilo bi se samo 3% opaženog otklona elektrometra. — Tako diskutira Lawrence, primjenjujući na elipsoid diskusiju, koju je prije njega proveo Swann za kuglu.<sup>239</sup> Oba pisca hoće da tim unapred pobiju eventualni pokušaj, da se rezultati njihovih mjerenja protumače s gledišta hipoteze o rotaciji silnica. Čini mi se, da se pisci kod toga nijesu dobro uživjeli u stanovište ove hipoteze. Jer prvi dio magnetskog toka u njihovoj zamisli, t. j. magnetski tok od magnetizacije željeza, ne bi zaista sudjelovao u *primarnom* efektu u željezu, dakle ni u sekundarnom efektu na kovnom obvoju. Ali zato bi taj isti dio inducirao *primarno* elektromotornu silu u kovnom obvoju, pa bi to po ovom njihovom razlaganju trebalo iznositi  $\frac{2}{3}$  opaženog efekta u Swannovim, a 97% u Lawrenceovim mjerenjima. S gledišta ove hipoteze radilo bi se *kvalitativno* o pitanju, je li opaženi naboj na kovnom obvoju primarno induciran ili je influenciran, kako je to već Preston formulirao. Kod primarnog induciranja trebalo bi kovni obvoj zajedno s vodovima k elektrometru promatrati kao Faradayev vanjski krug, koji je na dva mjesta prekinut. Međutim računi Swanna i Rognleya polaze sa pretpostavke, da se radi o influenciranom naboju, pa uprav u činjenici, da su se rezultati mjerenja vrlo dobro slagali s izračunanim vrijednostima, leži kvantitativno snaga dokaza Swannova pokusa.

U tom smislu pozitivni rezultati Swannova pokusa ne samo ne stoje u sukobu s negativnim rezultatom Faradayeva pokusa iz poglavlja 257. Dnevnika,<sup>240</sup> nego ovaj pokus potvrđuje Faradayeva nazore, jer je i po Faradayu očekivati u istim prilikama influenciju. Međutim se taj rezultat iz već navedenih razloga ne može primijeniti u prilog trećeg rezultata odbačenih

<sup>239</sup> Swann, l. c. <sup>232</sup>, p. 41.

<sup>240</sup> Vidi napomenu <sup>114b</sup> i tekst, na koji se ona odnosi.



Fehrleovih mjerenja već i zato, što se i po Swannu i po Pegramu vrtnja uzvojnice bitno razlikuje od vrtnje magneta.<sup>228b</sup>

Tateova radnja o unipolarnoj indukciji, koja je više puta spomenuta, izašla je nekako u isto doba sa Swannovom eksperimentalnom radnjom kao drugi dio elektrodinamike tjelesa u gibanju. Radnja je važna ne samo zato, što daje dobar kritički pregled ove posljednje skupine istraživanja počevši od Kennarda i od Barnetta s gledišta Maxwell-Lorentzove teorije, nego i zbog konačnog zaključka glede hipoteza o vrtnji i o mirovanju silnica, koji pisac donosi na kraju radnje. Taj Tateov zaključak glasi: »Teorija, koja traži, da linije magnetske indukcije rotiraju s magnetskim sustavom, daje općenito neispravne rezultate; ali se može upotrebiti za izračunavanje integralne vrijednosti elektromotorne sile oko zatvorenog kruga, od kojeg jedan dio rotira, a drugi dio miruje. — Teorija, koja traži, da linije magnetske indukcije miruju, dok magnet rotira kroz njih, dat će ispravne rezultate, ako je magnetski sustav vodič, ali će dati općenito neispravne rezultate, ako je magnetski sustav dielektrik«. <sup>241</sup> — Ovaj posljednji zaključak nije dovoljno obrazložen. —

Satyendra Ray u spomenutoj radnji,<sup>242</sup> publiciranoj g. 1920., stoji — kako se čini — na stanovištu, da silnice rotiraju. Za njega naime rotacija njegova radijalno magnetiziranog kotača predstavlja magnetsku konvektivnu struju. — Malo iza toga i Kimball kod tumačenja unipolarne rotacije polazi sa stanovišta vrtnje silnica s magnetom.<sup>242a</sup>

Indukcijom u vanjskom dijelu kruga tumači unipolarnu indukciju Stefanini,<sup>243</sup> ali na način, koji se razlikuje od dosadašnjih, a najbliže dolazi Plückerovom shvaćanju. Zamislimo, da je magnet sastavljen od mnoštva pravčastih magneta, kojih je dužina jednaka dužini tog magneta. Kod rotacije magneta uvijek novi polovi pravčastih magneta ulaze u krug, zatvoren vanjskom

<sup>241</sup> Tate, l. c., p. 95: »A theory which postulates that the lines of magnetic induction rotate with the magnetic system gives incorrect results in general, but may be used to calculate the integrated value of the electromotive force around a closed conducting circuit, part of which is rotating, and part stationary. — A theory which postulates that the lines of induction stand still while the magnetic system rotates through them will yield correct results, if the magnetic system is a conductor but incorrect results, in general, if it is dielectric«.

<sup>242</sup> S. Ray, l. c. 15b.

<sup>242a</sup> A. L. Kimball, Jr., Phys. Rev. (2) 28, 1302, 1926.

<sup>243</sup> A. Stefanini, Nuovo Cimento (6) 24, 35, 1922. — Vidi također: Stefanini, ibid. (6) 24, 29, 1922.

žicom kroz magnet, pa se tako magnetski tok u tom krugu jednoliko mijenja. Naprotiv rotacija idealnog pravčastog magneta oko njegove osi ne bi po Stefaniniju izvodila nikakve indukcije.

Prijepor između hipoteze o rotaciji silnica i hipoteze o njihovom mirovanju stigao je do našeg vremena skoro neublažen. Možda se silnice nije nikada zamišljalo kao neku formaciju niti, koje bi se vrtjele s magnetom; ali ih se zamišljalo kao stalnu tvari u prostoru oko magneta. Wien je njihovo gibanje doveo u oblik, koji dolazi bliže duhu Maxwellove teorije. U tom obliku nalazimo formuliran prijemor dviju hipoteza kod Baumgardta. Međutim posljednja formulacija, koju je pitanju dao Hoppe, ne slaže se ni s Wienovom ni s Baumgardtovom: »... jer se kod povlačenja silnica ne radi o povlačenju etera nego o promjeni stanja u položaju silnice«. <sup>244</sup> — Za električne silnice drži J. J. Thomson, da nijesu samo geometrijske fikcije nego da su one ili skupine njih, koje čine cijevi, fizikalna zbilja, te da je energija električnog polja vezana uz te cijevi. <sup>245</sup>

Poslije Blondelova pokusa, o kojem će biti govora u posebnom poglavlju, veže se, poglavito u engleskoj i američkoj literaturi, ovaj prijemor uz prijemor o općem zakonu indukcije: je li mjerodavno Faradayevo shvaćanje o rezanju silnica (the flux-cutting hypothesis) ili je mjerodavno Maxwellovo shvaćanje o obuhvaćanju silnica (the flux-linking hypothesis). Jer za jedne je unipolarna indukcija upravo najbolji primjer primjene hipoteze o rezanju silnica, dok je drugi tumače primjenom hipoteze o obuhvaćanju silnica. Svaka radnja o jednom dijelu ovih pitanja povlači onda za sobom diskusiju o cijelom čvoru. Jedna takva diskusija iz g. 1933. i 1934., o kojoj literaturu navodi Fleischmann, <sup>245a</sup> nije mi dostupna. Drugu takvu diskusiju izazvala je Crampova radnja o spornim pitanjima u nauci o elektricitetu. <sup>246</sup> — Drys-

<sup>244</sup> Edm. Hoppe, *Gesch. d. Physik*, I. c., S. 449: »Die Frage nach dem ruhenden oder mitbewegten Äther hat mit dieser Frage nichts zu thun; denn es handelt sich bei der Mitführung der Kraftlinie nicht um eine Mitführung des Äthers, sondern um eine Zustandsänderung in der Lage der Kraftlinie«.

<sup>245</sup> J. J. Thomson, *The Structure of Light*, Cambridge 1925, p. 20.

<sup>245a</sup> L. Fleischmann, *Naturwiss.* 23, 238, 1935.

<sup>246</sup> W. Cramp, *The Electrician* 121, 122, 151, 1938. — Vidi također: *ibid.*, F. A. Ledward, p. 238, 285; E. G. Cullwick, p. 286, 540; F. G. Bailey, p. 572; G. W. O. Howe, p. 315; W. Cramp, p. 665. Crampovi doprinosi ovoj diskusiji u brojevima istog časopisa od 30. IX. i 21. X. 1938 nijesu mi dostupni. — Nastavkom ove diskusije treba smatrati diskusiju između Howea i Culwicka: G. W. O. Howe, *The Electrician* 123, 289, 1939;



dale je nedavno doveo Maxwellove jednadžbe u oblik, u kojem one zadovoljavaju i princip rezanja silnica, da bi se tim olakšala njihova primjena s jedne strane na Faradayevu ploču i na unipolarnu indukciju, s druge strane na Rowlandov i na Eichenwaldov pokus.<sup>246a</sup>

Cramp i Norgrove<sup>247</sup> su dvije godine prije toga publicirali jednu eksperimentalnu radnju, u kojoj su opisali cijeli niz pokusa o unipolarnoj indukciji u zatvorenom krugu. Prvi dio radnje sadrži ponavljanje i verifikaciju nekih Faradayevih pokusa. Pisci su nadalje izmjerili raspodjelu inducirane elektromotorne sile uzduž magneta i uzduž solenoida sa željeznom jezgrom, koji rotiraju. Njihovi pokusi, kojima dokazuju, da magnet, koji rotira, ne izvodi ponderomotoričkog djelovanja na koaksijalno obješeni magnet, dijelom su obrati Faradayevih i Nobilievih pokusa, dijelom se svode na Le Rouxov pokus. O njihovoj varijanti Blondelova pokusa bit će govora u jednom kasnijem poglavlju.

Već kod Föppla nalazimo jedno mjesto, po kome bi se činilo, da su za unipolarnu indukciju neophodno potrebni sklizni kontakti.<sup>248</sup> Poincaré u svom prikazu Ampèreove i Helmholtzove elektrodinamike naglašuje, da je trajna unipolarna rotacija moguća samo onda, ako su čvrsti i pomični dio kruga (magnet u Ampèreovom pokusu) vezani skliznim kontaktima.<sup>249</sup> On to obrazlaže potencijalnim zakonom. U jednom od zaključaka gornje radnje od Crampa i Norgrova dolazi tvrdnja, da je unipolarni dinamo nemoguć bez skliznih kontakta.<sup>250</sup> — Međutim u prvim pokusima Faradayevim iz g. 1851. nije bilo skliznih kontakta, pa ipak je Faraday dobivao struju.<sup>251</sup> Doduše, mora se pretpostaviti, da je kod ovih Faradayevih mjerenja u dijelu zakreta, za koliko je on mogao okrenuti magnet, u znatnoj mjeri

124, 113, 323, 393, 1940. — E. G. Cullwick, *ibid.* 123, 553, 1939; 124, 6, 1940; 125, 203, 1940. Vidi također: *ibid.* 124, 352, 1940 (C. Turnbull, D. Robertson).

<sup>246a</sup> C. V. Drysdale, *Nature* 141, 254, 907, 1938. — Vidi također: J. A. Wilcken, *ibid.* 141, 907, 1938.

<sup>247</sup> W. Cramp a. E. H. Norgrove, *Journ. Inst. Electr. Eng.* 78, 481, 1936.

<sup>248</sup> A. Föppl, *l. c.* 200, S. 328.

<sup>249</sup> Poincaré, *La sc. & l' hypothèse*, *l. c.*, p. 267.

<sup>250</sup> Cramp a. Norgrove, *l. c.* 247, p. 489, VIII: »Therefore, no unipolar dynamo is possible without sliding contacts«.

<sup>251</sup> Faraday, *Exp. Res.*, vol. III, Ser. XXVIII, §§ 3091, 3095—3096; *Faraday's Diary*, §§ 11338—11339, 11342—11343.

sudjelovala i vanjska žica. Međutim izvođenje B l o n d e l o v a pokusa pomoću magneta, kako je opisano u sedmom poglavlju ove radnje, u onom spoju koji prolazi kroz magnet, jednoznačno pokazuje, da trajna unipolarna indukcija nastaje i bez skliznog kontakta u ekvatoru.<sup>252</sup> Isto tako nije nemoguće zamisliti magnet u istom ovom spoju u trajnoj unipolarnoj rotaciji bez skliznog kontakta; samo ako se može poslati dosta jaka struja.<sup>252a</sup> U jednom i u drugom slučaju trajanje pokusa ograničeno je samo duljinom žice, koja se namata oko ekvatora. Dakle sklizni kontakti nijesu ni za jedan ni za drugi pojav neophodno potrebni niti su bitni uslov. Njihova uloga je samo olakšanje izvedbe s eksperimentalnog gledišta.

Iz ovog se pregleda vidi, da je prijemor o pitanju, da li silnice rotiraju ili miruju, kad magnet rotira, ispunio veći dio istraživanja o unipolarnoj indukciji. Usprkos toliko negativnih mišljenja o takvoj formulaciji pitanja, počevši od P o i n c a r é a, nije taj prijemor utihnuo ni u ovom posljednjem deceniju. Mora se priznati, da upravo noviji nazori o unutrašnjoj strukturi magneta mogu govoriti u prilog zamisli, da su silnice vezane uz magnet. Uz predodžbu E w i n g o v i h i W e i s s o v i h područja spontane magnetizacije, u prilog kojima se tumači B a r k h a u s e n o v efekt, zaista čini poteškoća zamisao, da bi pojedine skupine silnica u magnetu mogle teći neovisno o položaju pojedinog takvog područja u magnetu, pa da zajedno s njim ne bi sudjelovale u vrtnji magneta. Ako se pak jednom dozvoli, da silnice rotiraju zajedno s područjima spontane magnetizacije, onda se i bez obzira na teoretsko pitanje njihovog diskontinuiteta na površini, kakav bi postojao, kad bi silnice izvan magneta mirovale, *mora* s eksperimentalnog gledišta zaključiti, da one s magnetom rotiraju i u okolnom mediju. Jer

<sup>252</sup> Razumije se samo po sebi, da je sklizni kontakt na osovinu magneta tim većma posve nebitan, pa se da zamijeniti mekom pletenom žicom, koju vodimo na zgodan način u produženju osovine, tako da se kod vrtnje tordira.

<sup>252a</sup> *Dodatak kod korekture.* U nizu istraživanja o unipolarnoj rotaciji u ljetu i jeseni g. 1941. ispitao sam i ovo pitanje. Ekvator magneta, koji je visio na tankoj čeličnoj žici, bio je spojen s vanjskim vodičem pomoću 30 cm gipke bakrene niti debljine 0,06 mm, koja je mlohavo visjela. Kako je bilo očekivati, magnet je dobivao otklone na pravu stranu s dovoljnom jednoznačnošću za mjerenje usprkos elektrodinamskom gibanju bakrene niti i njezinom mehaničkom otporu, koji djeluju nasuprot. Tako su zakreti magneta za 100 mA iznosili po-  
prečno 3,82° mjesto 4,45°, koliko je iznosio zakret magneta sa skliznim kontaktom.



inače ne bi bilo unipolarne indukcije. S w a n n je ipak našao srednji put, kojim je ovu dilemu mimoišao.

Od pisaca u posljednjem deceniju C r a m p,<sup>253</sup> te C r a m p i N o r g r o v e<sup>254</sup> zastupaju mišljenje, da silnice miruju. B e c k e r se doduše ne izražava za hipotezu o mirovanju silnica; ali za hipotezu o rotaciji silnica on drži, da je ona s gledišta M a x w e l l o v e teorije besmislena.<sup>255</sup> S druge strane F l e i s c h m a n n je mišljenja, da silnice rotiraju s magnetom; doduše on tu rotaciju zamišlja u ublaženom obliku: onako, kako zemaljski meridijani rotiraju sa zemljom.<sup>256</sup> Međutim i po njemu to vrijedi samo dotle, dok okolni medij ima posvuda jednaku permeabilnost. Ako pak vanjski prostor ima mjestimice različitu permeabilnost — kako je to u prije spomenutom L e c h e r o v u primjeru<sup>257</sup> — gubi po F l e i s c h m a n n u tvrdnja o rotaciji silnica svaki smisao, ako se ne ustanovi, kako će se pojedine silnice identificirati. Konačno M i e,<sup>258</sup> V a l e n t i n e r,<sup>259</sup> H o w e<sup>260</sup> stoje na P o i n c a r é o v u stanovištu, da je cijeli prijemor o tom pitanju nerješiv, jer je besmislen.

C u l l w i c k zastupa hipotezu gibanja magnetičkog polja, koju on stavlja u suprotnost M a x w e l l - L o r e n t z o v o j teoriji, po kojoj bi eter i magnetičko polje bili nepomični.<sup>260a</sup> Međutim on naglašuje, da za njega hipoteza polja, koje rotira, ili općenito polja, koje se giba, ima samo didaktičku prednost,<sup>260b</sup> pa zato ni njegov pokus ne može donijeti odluke između jedne i druge hipoteze.<sup>260c</sup> Razlike između jedne i druge hipoteze nastaju po njemu kod gibanja izolatora ili magnetičkih izolatora u magnetskom polju, gdje da je samo hipoteza gibanja polja u skladu s W i l s o n o v i m pokusima.

<sup>253</sup> W. Cramp, *Nature* 134, 139, 1934; *The Electrician* 121, 122, 151, 1938.

<sup>254</sup> Cramp a. Norgrove, l. c. <sup>247</sup>, p. 489; *ibid.* 79, 344, 1936, p. 347—348. Oni do tog zaključka dolaze na osnovu svojih pokusa. Njihov zaključak o tome pod V na str. 489 prve radnje nije u sukobu sa zaključkom pod I na istoj strani; radi se samo o metodičkoj diskusiji dviju različitih skupina pokusa.

<sup>255</sup> R. Becker, *Naturwiss.* 20, 917, 1932. — R. Becker, *Theorie d. Elektrizität*, Bd. II, Leipzig-Berlin 1933, S. 337.

<sup>256</sup> L. Fleischmann, *Naturwiss.* 23, 238, 1935.

<sup>257</sup> Lecher, l. c. <sup>156</sup>.

<sup>258</sup> G. Mie, l. c. <sup>273</sup>, S. 290.

<sup>259</sup> Valentiner, l. c. <sup>6</sup>, na prvom mjestu, S. 352.

<sup>260</sup> G. W. O. Howe, *Journ. Inst. Electr. Eng.* 79, 344, 1936, p. 345—346.

<sup>260a</sup> E. G. Cullwick, *Journ. Inst. Electr. Eng.* 85, 315, 1939; *The Electrician* 125, 203, 1940, p. 204.

<sup>260b</sup> Cullwick, *The Electrician* 123, 553, 1939; 125, 203, 1940, p. 204.

<sup>260c</sup> Cullwick, *Journ. Inst. Electr. Eng.*, l. c., p. 317; *ibid.* 86, 96, 1940.

Poveća Slepianova eksperimentalna i teoretska radnja dostupna mi je samo u referatima.<sup>261</sup> Pisac je pokusima dokazao postojanje naboja na magnetima u rotaciji bez razlike, da li su oni simetrični ili su nesimetrični, pa dolazi do zaključka, da se to ne da općenito dovesti u sklad ni s Faradayevom ni s Prestonovom hipotezom. Po njemu Faradayeve hipoteze vrijedi samo za simetrične magnete. Električnih naboja u okolnom prostoru, kakve traži Prestonova hipoteza, on nije mogao dokazati. Slepian uvodi novu sliku magnetskog polja, prema kojoj bi se magnetsko polje sastojalo od međusobno nezavisnih elementarnih dijelova, koji su vezani uz elektrone i magnetone kao elementarne izvore magnetizma. Svaki takav element magnetskog polja može se gibati tranzlatorno zajedno sa svojim izvorom, a ne sudjeluje u njegovoj rotaciji. Gibanje magnetnog polja je gibanje ovih međusobno nezavisnih dijelova. — Iz spomenutih izvadaka u referatima o ovoj radnji ne vidi se, kako to dovodi do unipolarne indukcije. Međutim treba primijetiti, da hipoteza o mirovanju silnica vrijedi jednako i za nesimetrične magnete; bar Faradayev složeni magnet iz g. 1851. dosta je daleko od cilindričke simetrije. Mora se ipak priznati, da primjena hipoteze rezanja silnica uz pretpostavku njihova mirovanja na jedan dio tih Faradayevih pokusa zaista čini poteškoća, o kojima će biti govora na kraju ove radnje.

\*

S gledišta Maxwelllova shvaćanja indukcije, t. j. s gledišta promjene magnetskog toka u zatvorenom krugu sastavljenom od magneta i od vanjskog vodiča obradili su teoriju unipolarne indukcije Lorentz, Abraham, Szarvassi, Jaumann, Mie i Becker.

Lorentz<sup>262</sup> i Abraham<sup>263</sup> obradili su je s gledišta Hertzove teorije tjelesa u gibanju. Formulu za induciranu elektromotornu silu oni izvođe u glavnom na isti način. Obojica polaze od Hertzove druge glavne jednadžbe tjelesa u gibanju, jer se magnetska struja  $\mathfrak{B}$ , od koje polazi Lorentz, zbog

<sup>261</sup> L. Slepian, Phys. ZS. d. Sowjetunion 3, 469, 1933 (Phys. Ber. 14, 1468, 1933; Journ. de phys. (7) 4 D, 481 D, 1933).

<sup>262</sup> H. A. Lorentz, Encyklop. d. math. Wissensch. V, 13, § 18, S. 99—101.

<sup>263</sup> M. Abraham u. A. Föppl, Theorie d. Elektrizität, Bd. 1, 2. izd., Leipzig 1904, S. 405—409.

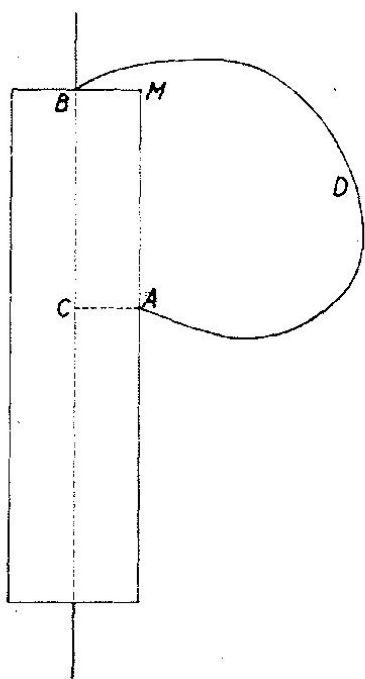


$\text{div } \mathfrak{B} = 0$ , svodi na desnu stranu druge glavne jednačbe. A pošto je i  $\frac{d\mathfrak{B}}{dt} = 0$ , reducira se druga glavna jednačba konačno na:

$$\text{curl } \mathfrak{E} = - \frac{1}{c} \text{curl} \cdot [\mathfrak{B} \mathfrak{v}] \quad (1)$$

Za izračunavanje elektromotorne sile na zatvorenoj krivulji  $ADBCA$  (sl. 1) imamo primjenom Stokesova pravila:

$$\begin{aligned} E &= \int \mathfrak{E} ds = \int df \cdot \text{curl } \mathfrak{E} = \\ &= - \frac{1}{c} \int \text{curl} [\mathfrak{B} \mathfrak{v}] df = \\ &= - \frac{1}{c} \int [\mathfrak{B} \mathfrak{v}] ds. \end{aligned} \quad (2)$$



Sl. 1. K Lorentzovoj i Szarvassievoj teoriji.

Ako magnet rotira, a vanjski vodič  $ADB$  miruje, imamo  $\mathfrak{v} = 0$  uzduž osi  $BC$  i uzduž vanjskog puta  $ADB$ , pa integracija uzduž  $ADB$  i uzduž  $BC$  daje nulu, tako da je vrijednost integrala određena samo integracijom uzduž okomice  $CA = a$ . Ako je kutna brzina  $\omega$ , onda je:

$$E = \int \mathfrak{E} ds = \frac{\omega}{c} \int_0^a \mathfrak{B}_n r dr, \quad (3)$$

gdje je  $\mathfrak{B}_n$  komponenta od  $\mathfrak{B}$  paralelna s rotacijonom osi. S druge strane je:

$$\int_0^a \mathfrak{B}_n \cdot 2\pi r dr = \Phi \quad (4)$$

ukupni magnetski tok, koji u krug ulazi kroz presjek magneta u jednom okretu. Dakle je konačno:

$$E = \frac{\omega}{2\pi c} \cdot \Phi \quad (5)$$

U skladu s Maxwellovim shvaćanjem indukcije uzima se kod ovoga, da se magnetski tok u zatvorenom krugu povećava na

taj način, što se ploha tog kruga povećava odvijanjem plohe, koju opisuje polumjer magneta u rotaciji, tako da ploha kruga poraste za  $\frac{\omega a^2}{2}$  u sekundi.

Istu bi vrijednost elektromotorne sile dao ma koji put integracije u magnetu, koji izlazi iz  $A$ , a svršava u osi  $BC$ . Po  $A$  b r a h a m u bismo dobili istu vrijednost i onda, kad bi magnet mirovao, a vanjski bi vodič prema njemu rotirao istom kutnom brzinom u suprotnom smjeru.

$S z a r v a s s i$ <sup>264</sup> nalazi pogrešku kod ovog postupka u tome, što integracija uzduž zatvorene krivulje  $ADBCA$  nije dozvoljena, jer je njom zatvorena ploha rastavljena crtom prekidnosti  $AMB$ , pa do primjene  $S t o k e s$  ova pravila u izračunavanju pod (2) ne može doći. Površina magneta je naime granica dvaju medija, na kojoj se tangencijalna komponenta brzine skokom mijenja u magnetnom polju, pa i tangencijalna komponenta vektora  $\mathcal{E}$  pravi skok, dok normalna komponenta brzine ostaje neprekidna. Dakle je površina magneta u rotaciji  $H e r t z$  ova sklizna ploha, pa na njoj nastaje beskonačno tanak sloj plošnih električnih vrtloga, dok  $\text{curl } [\mathcal{B}v]$ , a prema (1) i  $\text{curl } \mathcal{E}$  na njoj dobivaju beskonačno velike vrijednosti.

$S z a r v a s s i$  dokazuje, da u ovakvom slučaju ne može biti ni u magnetu ni u okolnom mediju drugih plošnih vrtloga osim ovih na površini magneta kao skliznoj plohi. S druge strane električno polje ima potencijal u magnetu i u vanjskom mediju. Izračunavanje raspodjele potencijala po meridijanskoj krivulji daje onda izraz, koji se podudara s jednadžbom (3).

$A b r a h a m$  je prihvatio ovaj  $S z a r v a s s i$  ev ispravak, pa u 4. izdanju (g. 1912.) svoje i  $F ö p p l o v e$  knjige izračunava elektromotornu silu kod unipolarne indukcije pomoću teorije skliznih ploha.<sup>265</sup> On naglašuje, da se iz druge  $H e r t z$  ove jednadžbe ne da odgovoriti na pitanje, u kojem se dijelu krivulje, koja omeđuje krug, inducira elektromotorna sila. »Inducirana se integralna elektromotorna sila raspodjeljuje na magnet i na vanjski vodič u omjeru njihovih otpora«.<sup>265a</sup>

<sup>264</sup>  $A. S z a r v a s s i$ , Ann. d. Phys. (4) 23, 73, 1907.

<sup>265</sup> Nije mi poznato, da li je to provedeno već u trećem izdanju prvog sveska (g. 1907.), jer mi ovo izdanje nije dostupno.

<sup>265a</sup>  $A b r a h a m$ , l. c. <sup>269</sup>, S. 378. — Isto prenosi od njega i  $V a l e n t i n e r$ , l. c. <sup>6</sup>, na prvom mjestu, str. 354.

Rad hrv. akad. 27.



Čini se, da ova Szarvassieva teorija nije inače došla do općenitijeg prihvatanja, jer kasnija teoretska obrađivanja unipolarne indukcije donose često i Lorentz-Abrahamov način.<sup>266</sup> Szarvassiev odnosno Szarvassi-Abrahamov postupak primijenili su u posljednje vrijeme Valentiner<sup>266a</sup> i Emde.<sup>267</sup>

Treba pripomenuti, da Szarvassieva teorija pokazuje upravo s gledišta Hertzove teorije, na kojoj počiva, slabu stranu u svojoj polaznoj pretpostavci o prekidnosti tangencijalne komponente brzine na prelazu iz magneta u vanjski medij. Već je Budde računao s postepenim prelazom iz površine magneta u vanjski medij; samo bi taj postepeni prelaz bio izvanredno nagao, jer bi se zbivao u granicama molekularnih dimenzija, i to kao posljedica toplinskog titranja jednih i drugih molekula.<sup>268</sup> S druge strane treba kod rotacije magneta računati i sa zavlačenjem najbližih slojeva zraka; s ovim se pak po Hertzu zavlači i eter. Onda je tim uklonjena prekidnost tangencijalne komponente brzine, koja je glavna karakteristika sklizne plohe.<sup>269</sup>

Međutim je ideja o plošnim električnim vrtlozima uz površinu magneta kao uzrocima unipolarne indukcije nešto starija od Szarvassieve radnje. Iznio ju je okruglo dvije godine ranije Jaumann, ali s posve drugog gledišta. Jaumann je do toga došao na osnovu svoje osebuje hipoteze, prema kojoj bi se svi elektromagnetski pojavi svodili na deformacije okolnog medija, kojemu on pripisuje svojstva Kundt ovih tekućina, kod kojih deformacija proizvodi dvolom. Odatle on izvodi jednadžbe elektromagnetskih pojava na tjelesima u gibanju. Po Jaumannu<sup>270</sup> unipolarna indukcija nastaje tim, što se slojevi okolnog medija uz čeonu plohu magneta, koji rotira, postepeno tordiraju. Takva deformacija medija je onda uzrok postanku električnih vrtloga, koji imaju sjedište u tordiranom mediju uz čeonu plohu. Na pobočju magneta deformacija medija sastoji samo od cilindričkog istezanja, pa tu ne nastaju

<sup>266</sup> N. pr.: H. Diesselhorst, l. c. <sup>62</sup>, S. 1324—1326.

<sup>266a</sup> Valentiner, l. c. <sup>6</sup> na oba mjesta. Prikaz na drugom mjestu je mjestimice skoro doslovno uzet iz članka istog pisca u Geiger-Scheelovu Handb. d. Phys., sv. XV, t. j. iz prvog mjesta.

<sup>267</sup> F. Emde, Elektrot. u. Maschinenbau 52, 477, 1934.

<sup>268</sup> E. Budde, Wied. Ann. 30, 358, 1887, S. 376.

<sup>269</sup> M. Abraham, Theorie d. Elektrizität, 7. izd. (1923), Bd. I, S. 373.

<sup>270</sup> G. Jaumann, Wiener Ber. 114, 1635, 1905, S. 1677—1680; ibid. 115, 337, 1906, S. 366—367; Ann. d. Phys. (4) 19, 881, 1906, S. 904—905.

plošni električni vrtlozi. U tome je važna razlika prema S z a r v a s s i u, kod kojega je sjedište plošnih vrtloga cijela površina magneta kao sklizna ploha, osim ekvatora, jer u ovome komponenta  $B_z$ , okomita na površinu, iščezava. Druga razlika između J a u m a n n a i S z a r v a s s i a je u tome, što kod J a u m a n n a nije preduslov prekidnost tangencijalnih komponenta brzine na granici između površine magneta i okolnog medija. Naprotiv se po svemu vidi, da prelaz brzina kod J a u m a n n a mora biti neprekidan, jer inače ne bi bilo postepene torzije medija. Za njega je važno, da torzija medija nastaje u blizini čeonih ploha, pa kod toga može vanjski medij jednim dijelom i rotirati kao čvrsto tijelo.<sup>271</sup> Zbog toga se kod njega plošni vrtlozi nalaze u tordiranom mediju ispred čeone plohe, a ne na samoj toj plohi. — Napokon po J a u m a n n u nema nikakve razlike između unipolarne indukcije i W i l s o n o v a pokusa, jer je za njega svejedno, da li rotira magnet ili jednaki stakleni cilindar, ako na njihovim čeonim ploham postoji jednako magnetsko polje. R o w l a n d o v a i R ö n t g e n o v a struja imaju se također pripisati torziji zračnih slojeva među pločama, koje rotiraju različitom brzinom.<sup>272</sup>

Možda se uplivu S z a r v a s s i a imaju pripisati i ona pojedina tumačenja unipolarne indukcije, gdje se kod L o r e n t z - A b r a h a m o v a postupka najveća važnost pripisuje povećavanju magnetskog toka odvijanjem površinske plohe magneta. Slično je tumačenje razvio M i e,<sup>273</sup> da bi unipolarnu indukciju doveo u sklad s općim zakonom indukcije, izrečenim u M a x w e l l o v o m duhu. Kod M i e a se kod rotacije magneta odvija jednostavno suvisla ploha, koja sastoji od cilindričkog plašta, od jednog radijalnog dijela i od polovine presjeka magneta. Samo nije jasno u njegovom prikazu, da li radijalni dio odvijene plohe leži u ravnini ekvatora ili u ravnini pola, dotično u čeonoj plohi magneta. Po njegovoj slici<sup>274</sup> vjerojatnije mi se čini ovo drugo. U slučaju, kad bi se tu radilo o odvijanju radijalne plohe u ravnini ekvatora, radilo bi se o dvama paralelno spojenim krugovima, u kojima se induciraju

<sup>271</sup> J a u m a n n, Wiener Ber. 114, I. c., S. 1678. — U radnji u Ann. d. Phys., I. c., suponira, da vanjski medij miruje, a da je samo tanki sklizni sloj ili sloj zraka između tijela u rotaciji i vanjskog medija deformiran.

<sup>272</sup> J a u m a n n, Wiener Ber. 114, I. c., S. 1676.

<sup>273</sup> G. M i e, Elektrodynamik (W i e n - H a r m s, Handb. d. Experimentalphysik, sv. XI/1), S. 288—389.

<sup>274</sup> M i e, ibid., str. 289, sl. 146.



točno jednake elektromotorne sile, ako se u cilindričku plohu uračuna i čeona ploha; dakle bi jedan krug bio suvišan.

L o r e n t z je problem unipolarne indukcije obradio i s gledišta svoje teorije elektrona.<sup>275</sup> On pokazuje, da se valjanost zakona indukcije proteže na tjelesa u gibanju i za slučaj magnetiziranih vodiča bilo da se uzme, da vodni elektroni nesmetano prolaze kroz magnetizirane čestice ili da oni ostaju u izvjesnoj daljini od tih čestica. Prema tome taj zakon vrijedi i za zatvorenu krivulju, koja posve ili djelomično prolazi kroz magnet. Odatle onda neposredno slijedi tumačenje unipolarne indukcije, kako ga je dao u prethodnoj radnji,<sup>276</sup> a o kojem je već bilo govora.

\*

Pojam silnica ostatak je težnja prošlosti, da bi se električki i magnetski pojavi sveli na mehaničke. Ni danas im se ne može poreći didaktička prednost i nesumnjiva olakšica u prikazivanju ponderomotoričkih pojava u magnetnom polju i indukcijonih pojava.<sup>276a</sup> Bez sumnje je njihovoj važnosti mnogo pridonio i povjesni slijed, kojim se spoznaja razvijala u ovim područjima. Jedno i drugo stvorilo je iz silnica pouzdanu okosnicu, oko koje su se i u eksperimentu i u teoriji grupirale nove spoznaje. Dok se nije nastojalo zaći u samu bitnost indukcije, jača okosnica nije bila ni potrebna. Sporednu ulogu igra kod toga okolnost, da su jedni silnice zamišljali posve realno i pripisivali im fizikalnu opstojnost, dok su one u očima drugih bile samo simboli.

Silnica definirana kao indukcijona linija po najčišćoj F a r a d a y evoj elektrodinamskoj definiciji još uvijek se makar i prikriveno oslanja na sliku silnica dobivenu piljevinom. Međutim se po duhu ove F a r a d a y eve definicije prostor oko magneta razlikuje od magnetski neutralnog prostora ili F a r a d a y eva umjetnog prostora bez magnetskog djelovanja<sup>277</sup> upravo tim, da se u žici, koju pomičemo tim prostorom, inducira elektromotorna sila. Da se

<sup>275</sup> H. A. L o r e n t z, Encyklop. d. math. Wiss. V/2, 14, §§ 42 i 49.

<sup>276</sup> L o r e n t z, l. c. <sup>282</sup>.

<sup>276a</sup> Takav zadatak silnica posve odgovara razlozima, kojima je njihovu prednost obrazložio F a r a d a y u § 13341 Dnevnika (Diary, vol. VI, p. 315; London 1935). Izrazi »magnetic current«, »magnetic flood« odnosit će se na Eulerovu hipotezu o strujama cetera. Vidi također: Exp. Res., vol. III, §§ 3300—3306, p. 528—532.

<sup>277</sup> F a r a d a y, Exp. Res., vol. III, §§ 3341—3343 (»places of no magnetic action«).

dakle kojim slučajem spoznaja u ovom području razvijala drugim povjesnim slijedom, pa da su pojavi indukcije bili otkriveni ranije i da se znalo istražiti magnetno polje F a r a d a y evom metodom uzvojnice ili žice u gibanju prije nego se znalo prikazati piljevinom tok silnica oko magneta, izašla bi naša osnovna slika o magnetskom prostoru znatno drukčija: magnetski prostor je prostor, u kome se zgodnim pomicanjem žice ili promjenama gustoće toka inducira struja u vodičima. Otkriće unipolarne indukcije na magnetu, koji rotira, bi onda u skladu s tom predodžbom neposredno dovelo do zaključka, da je i unutrašnjost magneta magnetski prostor, koji ima kvalitativno ista svojstva kao prostor oko magneta. Mjerenja bi pak pokazala, da je magnet u poredbi s prostorom oko njega prostor s pojačanim magnetskim svojstvima ili prostor s velikom gustoćom magnetskog toka.

Kod toga se ne pita, odakle magnetu to svojstvo, već se ono uzima kao eksperimentalna činjenica. Tako je već L o r e n t z u spomenutoj bilješci o unipolarnoj indukciji govorio o željezu ili čeliku, u kojima se *nalazi* magnetno polje.<sup>278</sup> Tu je osnovna misao ista kao kod F a r a d a y a, kad on ne vidi razlike između silnica, koje prolaze kroz magnet i kroz srebrnu ploču na čelu magneta.<sup>279</sup> Prednost ove predodžbe o magnetskom prostoru je u tome, što posve otpada potreba silnica i kao simbola. Važnost ima samo vektor gustoće magnetskog toka. — Napokon bi poslije ovakvog razvoja naknadno istraživanje ponderomotoričkih pojava u magnetnom polju i raspodjele gustoće u okolici magneta dovelo do toga, da bi se samom magnetnom prostoru pripisivala svojstva napetosti, koja obično pripisujemo silnicama uzduž njih i poprijeko na njih.

Po F a r a d a y evu i po N o b i l i e vu shvaćanju indukcija u kovnoj ploči, koja rotira u magnetnom polju zemlje ili pred polom magneta koaksijalno s njim ili u uzvojnici koaksijalno s osi uzvojnice, samo je specijalni slučaj indukcije u A r a g o ovoj ploči, koja rotira asimetrično među polovima magneta. S porastom simetrije prema magnetnom polju raspodjela elektromotornih sila dobiva sve više radijalan značaj. Po njima nema nikakve razlike ni među

<sup>278</sup> H. A. L o r e n t z, Coll., Papers, vol. III, p. 178: »Considérons maintenant un morceau de fer ou d'acier dans lequel il y a un champ magnétique...«.

<sup>279</sup> F a r a d a y's Diary, § 11642: »So that the lines passing through the silver disc and the magnet are by the experimental results the same in direction and nature«.



takvom pločom i magnetom, koji rotira oko svoje osi simetrije, jer je posve nebitna okolnost, da ovaj rotira u svom vlastitom magnetskom toku. U svima ovim slučajevima dobiva se ista radijalna raspodjela elektromotorne sile uz pretpostavku iste raspodjele magnetskog toka u onoj ravnini, u kojoj istražujemo raspodjelu elektromotorne sile.

Apstrahiramo li dakle od svih pitanja unutrašnje strukture magneta, magnet je s eksperimentalnog gledišta samo prostor s velikom gustoćom magnetskog toka. S gledišta elektronske teorije kovina jedna žica, koja rotira tranzversalno oko jedne svoje točke, jedan polumjer Faradayeve ploče ili jedan polumjer u kojem presjeku magneta samo su elektronski vodiči, koji se giblju u magnetskom prostoru. Magnetski tok gustoće  $\mathfrak{B}$  djeluje na elektron u translaciji brzinom  $\mathfrak{v}$  Lorentz ovom silom  $K = \frac{e}{c} [\mathfrak{v} \mathfrak{B}]$ .

Na jedinicu naboja u elektronskom vodiču djeluje sila  $\frac{1}{c} [\mathfrak{v} \mathfrak{B}]$ , koja izvodi pomicanje elektrona, dok tim proizvedena električna protivusila  $-\frac{1}{c} [\mathfrak{v} \mathfrak{B}]$  ne uspostavi ravnotežu.

Kad se usporede spomenuta dva poglavlja iz Lorentzove teorije elektrona,<sup>280</sup> vidi se, da on kod prelaza na unipolarnu indukciju, konačno pretpostavlja, da je u magnetiziranim vodičima gustoća magnetskog toka identična s vektorom  $\mathfrak{H}$ , kojim on označuje magnetsku silu u eteru. To je u skladu s njegovim zaključkom u spomenutoj bilješci na Vollgraffovu radnju, da kod unipolarne indukcije sudjeluje cijeli vektor indukcije. S tim se onda slaže gornja misao o magnetu kao magnetskom prostoru.

S ovog gledišta obradio je i unipolarnu indukciju i unipolarnu rotaciju Diesselhorst.<sup>280a</sup> Pomoću Lorentzove sile tumači Becker<sup>281</sup> Wilsonov pokus, pa to neposredno prenosi na kovni cilindar, koji rotira u magnetnom polju. Istim postupkom on izračunava pomoću Lorentzove sile i elektromotornu silu kod unipolarne indukcije.<sup>282</sup> Na to izlazi i njegovo tumačenje uni-

<sup>280</sup> Lorentz, l. c. <sup>275</sup>.

<sup>280a</sup> Diesselhorst, l. c. <sup>62</sup>, str. 1323—1326.

<sup>281</sup> R. Becker, Theorie d. Elektrizität, Bd. II, Leipzig-Berlin 1933, S. 254—255.

<sup>282</sup> Becker, ibid., S. 335—336.

polarne indukcije; samo što on kod toga ide korak dalje, pa traži porijeklo Lorentzove sile i električke polarizacije u magnetu, pa ga nalazi u Einsteinovoj specijalnoj teoriji relativnosti.<sup>283</sup> On naglašuje, da se unipolarna indukcija ne da shvatiti sredstvima predrelativističke elektrodinamike. Po njemu se električko polje, koje kod nje nastaje, da protumačiti samo kao neposredna posljedica Einsteinove definicije istodobnosti. Na ovu pojedinost Beckerova tumačenja primjećuje Emde, da je teorija relativnosti potrebna samo za pojave u izolatorima u gibanju, a ne za indukcijone pojave u kovinama u gibanju.<sup>284</sup> — Pripomenuti je i to, da indukcija u Beckerovu neobičnom magnetu, koji je kratak od pola do pola, a beskonačno je širok, posve odgovara indukciji u radijalno magnetiziranom kotaču Satyendra Raya, a preko ovoga odgovara i indukciji u središnjoj ploči rotora Poirsonova dinama.

Tako Faradayevo i Nobilievo shvaćanje unipolarne indukcije ostaje posve u skladu s posljedicama klasične elektronske teorije kovina. Može se reći, da je Lorentz usvojio i matematički formulirao Faradayevu misao. Pitanje o opravdanosti apstrakcije od unutrašnje strukture magneta moglo bi izazvati sumnju, da li možda rotacija područja spontane magnetizacije u gustom unutrašnjem magnetskom toku magneta ipak ne izaziva neke primarne indukcijone pojave u prostoru izvan magneta.<sup>284a</sup> Po svemu se čini, da bi ti indukcijoni pojavi, u koliko ih ima, mogli biti samo časoviti i višeg reda prema elektromotornoj sili izazvanoj unipolarnom indukcijom, isto kao što su višeg reda efekt centrifugacije elektrona i magnetski efekt njom izazvan,<sup>284b</sup> te Barnettov giromagnetički efekt<sup>284c</sup> ili oba efekta superponirana. Možda bi se moglo raditi o nekoj vrsti Barkhausenova pojava, koji bi se dao opaziti na vrlo tankim magnetima u rotaciji.

Električko stanje proizvedeno Lorentzovom silom na magnetu u vrtnji može se donekle usporediti s elektrostatičkom influencijom. Bitna je razlika dakako u tome, da ovo stanje kod

<sup>283</sup> Becker, *ibid.*, S. 336—338. — R. Becker, *Naturwiss.* 20, 917, 1932.

<sup>284</sup> F. Emde, *l. c.* 267.

<sup>284a</sup> Tako Kennard i Wang, i ponovno Kennard, ne zanemaruju unutrašnje strukture magneta ni kod recipročnog pojava, unipolarne rotacije. Cf: E. H. Kennard a. S. C. Wang, *Phys. Rev.* (2) 27, 460, 1926. — E. H. Kennard, *Phys. Rev.* (2) 43, 587, 1933.

<sup>284b</sup> E. F. Nichols, *Phys. ZS.* 7, 640, 1906. — G. Bonetto, *Rendic. Istit. Lombardo* (3) 1 [70], 444, 1937; *ibid.* (3) 2 [71], 252, 1938.

<sup>284c</sup> S. I. Barnett, *Phys. Rev.* (2) 6, 226, 1915.



djelovanja *L o r e n t z* ove sile zadržava cijelu unutrašnjost magneta, a nije ograničeno samo na površinu. U tome se shvaćanje unipolarne indukcije, kako je ovdje izloženo, potpuno podudara s rezultatom *S w a n n* ove teorije; jer je i po *S w a n n* u jedino *L o r e n t z* ova sila mjerodavna za konačnu elektrostatičku raspodjelu u vodljivom magnetu u vrtnji. Ako dakle takav magnet rotira izolirano, stvara se razlika potencijala između površine i osovine; ali ukupni električki naboj je nula. Prema tome, ako je izolirani magnet u vrtnji opkoljen izoliranom *S w a n n* ovom kuglom ili izoliranim cilindrom, na ovom obvoju ne nastaje nikakva promjena potencijala, ako vrtnju magneta zaustavimo ili ako ukinemo magnetno polje.<sup>285</sup> Jedan slobodni naboj ostaje oko ekvatora magneta, ako je os spojena sa zemljom.

*Dodatak.* Naknadno su izvedeni pokusi o spomenutom pitanju *B a r k h a u s e n* ova pojava kod rotacije magneta. Kao rotirajući magneti upotrebljene su simetrično magnetizirane čelične pletaće igle debljina 1,5 i 1 mm u različitim stadijima magnetizacije, čelična žica debljine 0,5 mm napeta uz luk žice od tvrdog mesinga, te remanentni magnetizam ravnih komada žice od mekog željeza, debljina 0,6 i 1 mm, također simetrično magnetiziranih. Dakle se radilo u opće o polikristaliničnom materijalu. Ove žice od mekog željeza daju vrlo jak normalni longitudinalni *B a r k h a u s e n* ov efekt. Upotrebljena su vrlo visoka pojačanja. Igle ili žice su bile učvršćene u osovinu rotacijonog aparata, koji je okretan rukom. Na čeličnim iglama i žicama nije se dalo kod vrtnje ništa zamjetiti. Ako se žica od mekog željeza oslanja drugim vrhom, koji je bio glatko zašiljen, na čepu od kaučuka kao mekom ležaju, još uvijek se čuje kod vrtnje slab šum. Da taj dolazi od trenja, pokazuje to, što se ovaj šum jako umanjuje, ako se vrh žice i kaučuk namažu skliskom kaučukovom mašću. Ako je ovaj drugi vrh žice slobodan, čuje se kod vrtnje vrlo slab ton, koji odgovara osnovnom tonu te žice, pričvršćene na jednom kraju, a dolazi od neznatnog trenja u osovinu aparata za vrtnju. Nije se dao u nijednom slučaju zamjetiti nikakav šum, koji bi se mogao pripisati eventualnom *B a r k h a u s e n* ovu efektu kod vrtnje. Razlog bi mogao ležati i u tome, što bi eventualne promjene tako reći fine strukture magnetizacije ležale u području *R a y l e i g h* ovih reversibilnih promjena.<sup>285a</sup>

<sup>285</sup> *S w a n n*, l. c. <sup>232</sup>, p. 39—40.

<sup>285a</sup> *Lord Rayleigh Scientific Papers vol. II*

BIBLIOGRAFIJA.<sup>286</sup>

## I. Od g. 1831. do g. 1850.

1. M. Faraday, *Experimental Researches in Electricity*; vol. I, London 1839; vol. II, London 1844; vol. III, London 1855. Facsimile reprint.

Prevodi: Poggendorffov prevod I. i II. niza, izašao u Pogg. Ann., pretiskan u Ostwald's Klassiker, Nr. 81.

S. Kalischer, *Experimental - Untersuchungen über Elektrizität von Michael Faraday*; Bd. I, Berlin 1889; Bd. II, Berlin 1890; Bd. III, Berlin 1891.

2. Faraday's Diary, being the Various Philosophical Notes of Experimental Investigation.

Vol. I. (Sept. 1820. — 11. VI. 1832.), London 1932.

Vol. V. (6. IX. 1847. — 17. X. 1851.), London 1934.

3. G. Th. Fechner, Ueber die Verknüpfung der Faraday'schen Inductions-Erscheinungen mit den Ampèreschen elektrodynamischen Erscheinungen.

Pogg. Ann. 64, 337—345, 1845; S. 343—344.

4. E. Lenz, Ueber die Bestimmung der durch elektrodynamische Vertheilung erregten galvanischen Ströme.

Pogg. Ann. 31, 483—494, 1834.

5. L. Nobili, Teoria fisica delle induzioni elettromagnetiche.

\* Antologia di Firenze No. 142, 1832; takoder:

L. Nobili, Memorie ed osservazioni edite ed inedite, vol. I., p. 255—279, Firenze (Passigli) 1834.

\* Prevod: Pogg. Ann. 27, 401, 1833.

6. W. Ritchie, Zurückführung der von Hrn. Faraday entdeckten magneto-elektrischen Vertheilung auf ein allgemeines Gesetz.

Pogg. Ann. 31, 203—206, 1834, S. 205.

Original: \* Phil. Mag. (3) 4, 1834.

7. W. Weber, Unipolare Induction.

Pogg. Ann. 52, 353—386, 1841.

<sup>286</sup> Nastojao sam dati ovdje što potpuniju bibliografiju o unipolarnoj indukciji. Zato sam naveo i one radnje i djela, do kojih nijesam mogao doći u originalu. Kod tih sam radnja ovu okolnost označio zvjezdicom ispred pišćeva imena ili ispred časopisa, u kojemu je radnja publicirana. Mjesto, odakle su uzeti podaci o toj radnji, navedeno je u zagradi. — Djelomično su obuhvaćena i srodna područja, napose unipolarna rotacija i Wilsonov pokus. — Imena pisaca poručana su u pojedinim vremenskim skupinama alfabetskim redom.



## II. Od g. 1851. do g. 1900.

8. A. Beer, Ueber das Verhältniß des Laplace-Biot-schen Gesetzes zu Ampère's Theorie des Magnetismus: Vergleich der von Neumann und Plücker aufgestellten Theorien der magnetoelektrischen Induction.

Pogg. Ann. 94, 177—192, 1855.

9. E. Budde, Mittel zur praktischen Entscheidung zwischen den elektrodynamischen Punktgesetzen von Weber, Riemann und Clausius.

Wied. Ann. 30, 100—156, 1887; S. 135—156.

10. E. Budde, Ueber die Grundgleichung der stationären Induction durch rotirende Magnete und über eine neue Classe von Inductionerscheinungen.

Wied. Ann. 30, 358—389, 1887.

11. J. J. T. Chabot, Combination of an Experiment of Ampère with an Experiment of Faraday.

Phil. Mag. (5) 47, 331, 1899.

12. E. Edlund, Erwiderung auf zwei gegen die unitarische Theorie der Elektrizität gemachte Einwürfe.

Pogg. Ann. 156, 590—601, 1875.

13. E. Edlund, Beantwortung der von W. Weber gemachten Bemerkungen, die unipolare Induction betreffend.

Pogg. Ann. 157, 630—631, 1876.

14. E. Edlund, Bemerkungen zu dem Aufsatz des Herrn Professor C. Neumann über die Anzahl der elektrischen Materien.

Pogg. Ann. 160, 617—623, 1877.

15. E. Edlund, Ueber den Zusammenhang der electromagnetischen Rotation mit der unipolaren Induction.

Wied. Ann. 2, 347—356, 1877.

16. \* E. Edlund, Recherches sur l'induction unipolaire, l'électricité atmosphérique et l'aurore boréale.

Vetensk. Akad. Handl. (Stockholm) 16, 1878 (Ann. Beibl. 2, 661—666, 1878, autoreferat). — *Prevod*:

16a. E. Edlund, Researches on Unipolar Induction, Atmospheric Electricity, and the Aurora Borealis.

Phil. Mag. (5) 6, 289—306, 360—371, 423—436, 1878.

17. \* E. Edlund, Sur la déduction d'un phénomène électrique resté inexpliqué jusqu'ici.

Bihang Vetensk. Akad. Handl. (Stockholm) 5, 1879 (Ann. Beibl. 3, 755—757, 1879, autoreferat).

18. \* E. Edlund, Note sur la théorie de l'induction unipolaire.

Bihang Vetensk. Akad. Handl. (Stockholm) 21, 1885.



19. E. E d l u n d, Bemerkungen zu der Abhandlung des Hrn. H o p p e: »Zur Theorie der unipolaren Induction«.

Wied. Ann. 29, 420—427, 1886.

20. E. E d l u n d, Erwiderung auf die letzten Bemerkungen des Hrn. H o p p e über die unipolare Induction.

Wied. Ann. 30, 655—660, 1887.

21. \* E. E d l u n d, Théorie de l' induction unipolaire. Vetensk. Akad. Handl. (Stockholm) 22, 1887 (Ann. Beibl. 11, 793, 1887). — *Prevod*:

21a. E. E d l u n d, On the Theory of Unipolar Induction. Phil. Mag. (5) 24, 401—422, 1887.

22. E. E d l u n d, Über unipolare Induction.

Wiener Ber. 95, 97—103, 1887.

23. F. E x n e r u. P. C z e r m a k, Über unipolare Induction.

Wiener Ber. 94, 357—366, 1887.

24. M. F a r a d a y, On lines of Magnetic Force; their definite character; and their distribution within a Magnet and through space.

XXVIII Series; l. c. 1, vol. III, p. 328—370 (§§ 3070—3132, §§ 3171—3176).

25. M. F a r a d a y, On the Lines of Magnetic Force.

L. c. 1, vol. III, p. 402—406.

26. R. F e l i c i, Sulla teoria matematica dell' induzione elettrodinamica.

\* Annali delle università toscane III/2, 1—30, 1854; III/2, 99—136, 1854; IV/2, 5—23, 1855.

Njemački prevod: O s t w a l d's Klassiker, No. 109.

27. L. F l e i s c h m a n n, Über die Wirkung eines geraden Stromes auf einen sogenannten magnetischen Pol.

ZS. f. Unterr. 8, 361—363, 1895.

28. A. F ö p p l, Unipolare Induction.

F ö p p l, Einführung i. d. M a x w e l l'sche Theorie d. Elektriz., Leipzig 1894, § 121, S. 327—330.

29. H. H i m s t e d t, Einige Versuche über Induction in körperlichen Leitern.

Wied. Ann. 11, 812—832, 1880.

30. E d m. H o p p e, Zur Theorie der unipolaren Induction.

Wied. Ann. 28, 478—491, 1886.

31. E d m. H o p p e, Zur Theorie der unipolaren Induction.

Wied. Ann. 29, 544—560, 1886.

32. E d m. H o p p e, Zur magnetelectrischen Induction.

Wied. Ann. 32, 297—310, 1887.

33. G. J a u m a n n, Rotierendes Magnetfähnchen.

Wiener Ber. 108, 1529—1534, 1899.



34. E. Jochmann, Über die durch Magnetpole in rotierenden körperlichen Leitern inducirten elektrischen Ströme.

Pogg. Ann. 122, 214—237, 1864.

35. F. Koch, Untersuchungen über die magnetelectrischen Rotationserscheinungen.

Wied. Ann. 19, 143—183, 1880.

36. W. König, Ein electromagnetischer Rotationsapparat.

Wied. Ann. 60, 519—522, 1897.

37. W. König, Zwei Erwiderungen.

Ann. d. Phys. (4) 2, 854—862, 1900.

38, 39. E. Lecher, Eine Studie über unipolare Induction.

Wiener Ber. 103, 949—980, 1894.

Wied. Ann. 54, 276—304, 1895.

40, 41. E. Lecher, Über einen experimentellen und theoretischen Trugschluss in der Elektrizitätslehre.

Wiener Ber. 108, 977—988, 1899.

Wied. Ann. 69, 781—787, 1899.

42. E. Lecher, Über unipolare Induction und den Pohl'schen Versuch.

Ann. d. Phys. (4) 3, 513—521, 1900.

43. O. Lodge, On an Electrostatic Field Produced by Varying Magnetic Induction.

Phil. Mag. (5) 27, 469—478, 1889, p. 469—470.

44. O. Lodge, Modern Views of Electricity, § 73.

Njemački prevod, Leipzig 1896, S. 184—185.

45. H. Lorberg, Ueber Magnetinduction und über einige Folgerungen aus dem Clausius'schen Grundgesetz der Elektrodynamik.

Pogg. Ann., Erg.-Bd. VIII, 581—598, 1878.

46. H. Lorberg, Ueber das Grundgesetz der Elektrodynamik.

Pogg. Ann., Erg.-Bd. VIII, 599—607, 1878.

47. H. Lorberg, Zur Theorie der magnetelectrischen Induction.

Wied. Ann. 36, 671—692, 1887.

48. H. Lorberg, Einige Bemerkungen zu zwei Aufsätzen von Lecher und König.

Ann. d. Phys. (4) 3, 522—529, 1900.

49. L. Lorenz, Der elektrische Leitungswiderstand des Quecksilbers in absolutem Maasse.

Pogg. Ann. 149, 251—269, 1873.

50. L. Lorenz, Bestimmung der electrischen Widerstände von Quecksilbersäulen in absolutem electrischen Maasse.

Wied. Ann. 25, 1—30, 1885.

51. \* C. Matteucci, Cours spécial sur l'induction, le magnétisme de rotation, le diamagnétisme et sur les relations entre la force magnétique et les actions moléculaires. Paris (Mallet-Bachelier) 1854.

52. J. C. Maxwell, On Faraday's Lines of Force; (1855—1856).

Njemački prevod (Boltzmann): Ostwald's Klassiker, Nr. 69.

53. J. C. Maxwell, On Physical Lines of Force; (1861—1862).

Njemački prevod (Boltzmann): Ostwald's Klassiker, Nr. 102.

54. J. C. Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism. Vol. II, § 533; 3. izd., Oxford 1904, p. 180—181.

55. Müller-Pouillet, Lehrb. d. Physik u. Meteorologie. 9. izd., Braunschweig 1888—1890, sv. III, str. 709—713.

56. C. Neumann, Ueber die gegen das Weber'sche Gesetz erhobenen Einwände.

Pogg. Ann. 155, 211—230, 1875.

57. C. Neumann, Ueber die Anzahl der elektrischen Materien.

Pogg. Ann. 159, 301—312, 1876.

58. J. Plücker, Ueber die Reciprocität der elektro-magnetischen und der magneto-elektrischen Erscheinungen.

Pogg. Ann. 87, 352—386, 1852.

59. \* H. Poincaré, Sur l'induction unipolaire.

L'clair. électr. 23, 41—53, 1900 (Ann. Beibl. 24, 1013, 1900).

60. S. T. Preston, On Some Electromagnetic Experiments of Faraday and Plücker.

Phil. Mag. (5) 19, 131—140, 1885.

61. S. T. Preston, On Some Electromagnetic Experiments, Continued. — No. II. Diverse Views of Faraday, Ampère and Weber.

Phil. Mag. (5) 19, 215—218, 1885.

62. S. T. Preston, The Problem of the Behaviour of the Magnetic Field about a Revolving Magnet.

Phil. Mag. (5) 31, 100—102, 1891.

63. \* C. Raveau, Sur la loi élémentaire de l'électromagnétisme.

C. R. 130, 31—32, 1900 (Ann. Beibl. 24, 528, 1900).

64. \* C. Raveau, Sur la loi élémentaire des actions électromagnétiques et l'induction unipolaire.

L'clair. électr. 22, 161—166, 1900 (Ann. Beibl. 24, 705, 1900).



65. C. R a v e a u, Sur la loi élémentaire de l' électromagnétisme.

Journ. de physique (3) 9, 150—153, 1900.

66. E. R i e c k e, Zur Theorie der unipolaren Induction und der P l ü c k e r s c h e n Versuche.

Wied. Ann. 1, 110—126, 1877.

67. E. R i e c k e, Über die sogenannte unipolare Induction.

Wied. Ann. 11, 413—432, 1880.

68. E. R i e c k e, Ueber die electromagnetische Rotation einer Flüssigkeit.

Wied. Ann. 25, 496—511, 1885.

69. F. P. L e R o u x, Sur l' induction péripolaire.

C. R. 75, 1805—1809, 1872.

70. Th. W a n d, Beiträge zur Elektrodynamik.

Pogg. Ann. 159, 94—117, 1876; S. 115—117.

71. W. W e b e r, Bemerkungen zu E d l u n d 's Erwiderung auf zwei gegen die unitarische Theorie der Elektrizität gemachte Einwürfe.

Pogg. Ann. 157, 146—149, 1876.

72. G. W i e d e m a n n, Die Lehre vom Galvanismus u. Elektromagnetismus, Bd. II/2, 2. izd., Braunschweig 1874, S. 32—43, 80—84, 187—190.

73. W. W i e n, Über die Bewegung der Kraftlinien im elektromagnetischen Felde.

Wied. Ann. 47, 327—344, 1892.

74. A. W i n k e l m a n n, Unipolare Induction.

W i n k e l m a n n, Handbuch der Physik, Bd. III/2, Breslau 1895, S. 371—373.

75. F. Z ö l l n e r, Ueber die unipolare Induction eines Solenoides. — Pogg. Ann. 160, 604—617, 1877.

### III. Od g. 1901. do g. 1939.

76. M. A b r a h a m u. A. F ö p p l, Unipolare Induktion.

Theorie der Elektrizität, Bd. I, 2. izd., Leipzig 1904, § 87, S. 405—408; 4. izd., Leipzig 1912, § 90, S. 395—397.

77. M. A b r a h a m, Unipolare Induktion.

Theorie d. Elektrizität, Bd. I, 7. izd., Leipzig-Berlin 1923, § 90, S. 375—379.

78. R. A p p l e y a r d, Fundamental Physical Structure.

Nature 142, 537, 1938.

79. R. A p p l e y a r d, A Comprehensive Fundamental Electrical Formula.

Nature 142, 1163, 1938

80. S. J. Barnett, An Investigation on the Electric Intensities and Electric Displacement Produced in Insulators by their Motion in a Magnetic Field.

Phys. Rev. (1) 27, 425—472, 1908.

81. S. J. Barnett, Bemerkung zu Hrn. L. Baumgardts Angaben bezüglich der Möglichkeit eines entscheidenden Experiments über unipolare Induktion.

Ann. d. Phys. (4) 30, 416, 1909.

82. S. J. Barnett, Einige Versuche über elektromagnetische Induktion und Relativbewegung.

Phys. ZS. 13, 803—805, 1912.

83. S. J. Barnett, On Electromagnetic Induction and Relative Motion.

Phys. Rev. (1) 35, 323—336, 1912.

84. S. J. Barnett, Unipolare Induktion und Relativbewegung.

Phys. ZS. 14, 251—252, 1913.

85. S. J. Barnett, Eine Entgegnung auf die Arbeit des Herrn Fehrlé: »Über unipolare Induktion«.

Ann. d. Phys. (4) 45, 1253—1256, 1914.

86. S. J. Barnett, Some Experiments on the Magnetic Field of two Electromagnets in Rotation.

Phil. Mag. (6) 26, 987—991, 1913.

87. S. J. Barnett, On Electromagnetic Induction.

Phys. Rev. (2) 2, 323—326, 1913.

88. \* S. J. Barnett, On Electromagnetic Induction and Relative Motion.

Phys. Rev. (2) 12, 85—104, 1918.

89. \* S. J. Barnett, Note on Electromagnetic Induction and Relative Motion.

Phys. Rev. (2) 15, 527—528, 1920 (Phys. Ber. 2, 48, 1921; Journ. de physique (6) 2 D, 54 D, 1921).

90. L. Baumgardt, Über die Möglichkeit einer Nutzanwendung des Wilson effektes.

Ann. d. Phys. (4) 23, 986—987, 1907.

91. R. Becker, Unipolar-Induktion als Folge des relativistischen Zeitbegriffs.

Naturwiss. 20, 917—919, 1932.

92. R. Becker, Die Unipolarmaschine.

Becker, Theorie d. Elektrizität, Bd. II, Leipzig-Berlin 1933, § 62, S. 334—338.

93. A. Blondel, Sur l'énoncé le plus général des lois de l'induction.

C. R. 159, 674—679, 1914.



94. W. Bragg, Success after Failure. Magnetism and Electricity.

The Times, Faraday Nr. (Nr. 45.933, 21. IX. 1931.), p. VIII.

95. E. Budde, Bemerkung zu einer Abhandlung des Herrn Satyendra Ray.

ZS. f. Phys. 3, 287—288, 1920.

96. H. Cahen, Über unipolare Induktion.

Elektrot. ZS. 23, 921—926, 1902.

97. F. Celeri, Sul meccanismo dei contatti striscianti nei sistemi per induzione e rotazione unipolare. Padova 1939, VII + 237.

98. J. J. T. Chabot, Über den Durchgang des elektrischen Stromes durch ein gasförmiges Medium im Felde rotierenden Magnete.

Phys. ZS. 3, 553—554, 1902; ibid. 4, 189—190, 1903.

99. O. D. Chwolson, Unipolare Induktion.

Chwolson, Lehrb. d. Phys., IV/2, Braunschweig 1913, S. 308—310, S. 315.

100. A. Cotton, Expériences d'électromagnétisme. Expériences avec des courants très intenses.

La Nature (Paris), No. 3008, 238—245, 1937; p. 240—241.

101. W. Cramp, Nature of a Magnetic Field.

Nature 134, 139, 1934.

102. W. Cramp, Controversies in Electro-magnetism. I. Magnetic Force and Magnetic Induction.

The Electrician 121, 122—123, 1938; II, ibid., 121, 151—152, 1938. — Vidi takoder: ibid., pp. 238, 285 (T. A. Ledward); pp. 286, 540 (E. G. Cullwick); p. 572 (F. G. Baily); p. 315 (G. W. O. Howe); p. 665 (W. Cramp).

103. W. Cramp a. E. H. Norgrove, Some Investigations on the Axial Spin of a Magnet and the Laws of the Electro-magnetic Induction.

Journ. Inst. Electr. Eng. 78, 481—491, 1936.

104. E. G. Cullwick, An Experiment on Electromagnetic Induction by Linear Motion.

Journ. Inst. Electr. Eng. 85, 315—318, 1939.

105. —, Discussion on »Some Investigations on the Axial Spin of a Magnet and on the Laws of Electromagnetic Induction«.

Journ. Inst. Electr. Eng. 79, 344—348, 1936 (W. F. Cooper, A. H. Finlay, G. W. O. Howe, W. Cramp a. E. H. Norgrove).

106. —, Discussion on »An Experiment on Electromagnetic Induction by Linear Motion«.

Journ. Inst. Electr. Eng. 86, 96—97, 1940 (G. H. Rawcliffe, E. G. Cullwick).

107. H. Diesselhorst, Elektrodynamik (L. Graetz, Handb. d. Elektriz. u. d. Magnetismus, Bd. IV, Leipzig 1920, S. 1121—1326), S. 1323—1326.

108. C. V. Drysdale, A Simplification of Maxwell Equations in Conformity with the Flux-cutting Principle.

Nature 141, 254—256, 1938.

109. C. V. Drysdale, Maxwell's Equations and the »Flux-cutting« Principle.

Nature 141, 907—908, 1938.

110. C. V. Drysdale, Fundamental Physical Concepts. Nature 142, 288—289, 1938.

111. C. V. Drysdale, A Comprehensive Fundamental Electrical Formula.

Nature 142, 995—996, 1938; 143, 601, 1939.

112. C. V. Drysdale, Magnetism and the Maxwellian Theory.

Nature 143, 277—278, 1939.

113. W. F. Duntton, A Comprehensive Fundamental Electrical Formula.

Nature 143, 601, 1939.

114. K. Düsing, Rotation im Magnetfelde.

Ann. d. Phys. (4) 12, 1158—1159, 1903.

115. H. Ebert, Unipolare Induktion.

Ebert, Magn. Kraftfelder, 2. izd., Leipzig 1905, § 146, S. 238—241.

116. F. Emde, Unipolare Wirkungen.

Elektrot. ZS. 24, 576—577, 1903.

117. F. Emde, Zerlegung des magnetischen Bewegungsschwundes.

Elektrot. u. Maschinenbau 52, 477—479, 1934.

118. K. Fehrle, Über die Rolle des Dielektrikums bei der unipolaren Induktion.

Ann. d. Phys. (4) 42, 1109—1128, 1913.

119. Cl. Feldmann, Die azyklische Maschine von J. E. Noeggerath.

Elektrot. ZS. 26, 831—834, 1905. — Vidi također: F. Tischendörfer, ibid. 26, 806—807, 1905.

120. K. T. Fischer, Ein neues Magnetometer zur direkten Messung von Feldstärken mittels Voltmeters (Induktionsrädchen).

Verh. d. deutschen phys. Ges. 7, 434—439, 1905.

121. L. Fleischmann, Zur Frage der unipolaren Induktion.

Naturwiss. 23, 238—240, 1935.

Rad hrv. akad. 274.



122. R. Gans, Ansicht des Referenten.<sup>287</sup>  
Ann. Beibl. 29, 966, 1905.
123. L. Graetz, Unipolare Induktion.  
Graetz, Handb. d. Elektriz. u. d. Magnet., Bd. V., Leipzig  
1928, S. 20—29.
124. O. Grotrian, Elektrometrische Untersuchungen über  
unipolare Induktion.  
Ann. d. Phys. (4) 6, 794—817, 1901.
125. O. Grotrian, Die Unipolarmaschine ohne Eisen.  
Ann. d. Phys. (4) 10, 270—286, 1903.
126. E. Hagenbach, Der elektromagnetische Rotations-  
versuch und die unipolare Induktion.  
Ann. d. Phys. (4) 4, 233—276, 1901.
127. J. Hollingworth, Electromagnetic Induction. Re-  
lation between Induction and Radiation.  
The Electrician 120, 61—62, 1938.
128. Edm. Hoppe, Unipolare Induktion.  
Ann. d. Phys. (4) 8, 663—674, 1902.
129. Edm. Hoppe, Zur Konstitution der Magnete.  
Phys. ZS. 5, 650—654, 1904.
130. Edm. Hoppe, Zur Konstitution der Magnete.  
Verh. d. deutschen phys. Ges. 6, 234—238, 1904.
131. Edm. Hoppe, Zur Konstitution der Magnete. Erwide-  
rung auf die Bemerkungen des Herrn G. (sic!) Valentiner.  
Phys. ZS. 6, 340—342, 1905.
132. Edm. Hoppe, Geschichte der Physik, Braunschweig  
1926, S. 447—449.
133. \* F. Huth, Über die Unipolarerscheinungen.  
Dissertation, Halle 1902 (Ann. Beibl. 28, 198, 1904).
134. G. Jaumann, Elektromagnetische Vorgänge in be-  
wegten Medien.  
Wiener Ber. 114, 1635—1684, 1905; Die Unipolarinduktion,  
S. 1677—1680.
135. G. Jaumann, Elektromagnetische Vorgänge in be-  
wegten Medien, II. Mitteilung.  
Wiener Ber. 115, 337—390, 1906; Die Unipolarinduktion  
und der Wilsonsche Versuch, S. 366—367.
136. G. Jaumann, Elektromagnetische Vorgänge in be-  
wegten Medien.  
Ann. d. Phys. (4) 19, 881—917, 1906; § 13, Die Unipolar-  
induktion und der Wilsonsche Versuch, S. 904—905.

<sup>287</sup> Pišček dodatak prikazu diskusije između Valentiner, R. H. Webera i Hoppea.

137. E. H. Kennard, Unipolar Induction.  
Phil. Mag. (6) 23, 937—941, 1912.
138. E. H. Kennard, Unipolare Induktion und im Magnetfeld rotierender Kondensator.  
Phys. ZS. 13, 1155—1157, 1912.
139. E. H. Kennard, Dielektrika und unipolare Induktion.  
Phys. ZS. 14, 250—251, 1913.
140. E. H. Kennard, The Effect of Dielectrics on Unipolar Induction.  
Phys. Rev. (2) 1, 355—359, 1913.
141. \* E. H. Kennard, Phys. Rev. (2) 7, 399, 1916.<sup>288</sup>
142. E. H. Kennard, On Unipolar Induction: another Experiment and its Significance as Evidence for the Existence of the Ether.  
Phil. Mag. (6) 33, 179—190, 1917.
143. E. H. Kennard, The Torque on Faraday's Magnet.  
Phys. Rev. (2) 43, 587—588, 1933.
144. E. H. Kennard a. S. C. Wang, Forces on a Rigid Magnetized Conductor.  
Phys. Rev. (2) 27, 460—469, 1926.
145. A. L. Kimball, Jr., Torque on Revolving Cylindrical Magnet.  
Phys. Rev. (2) 28, 1302—1308, 1926.
146. E. Lawrence, The Charging Effect Produced by the Rotation of a Prolate Iron Spheroid in a Uniform Magnetic Field.  
Phil. Mag. (6) 47, 842—847, 1924.
147. E. Lecher, Bemerkung zu der Abhandlung des Herrn E. Hoppe: »Unipolare Induktion«.  
Ann. d. Phys. (4) 9, 248, 1902.
148. E. Lecher, Über unipolare Induktion und den Pohl-schen Versuch.  
Phys. ZS. 2, 62, 1901 (autoreferat),
149. —, Der Faraday'sche Rotationsversuch und die unipolare Induktion.  
Phys. ZS. 2, 387—388, 1901 (Diskusija: König, Lecher, Warburg, Lorentz, Sommerfeld, Mie, Reinganum).
150. H. A. Lorentz, Der magnetische Strom und die unipolare Induktion. Dualität zwischen den elektrischen und den magnetischen Erscheinungen.  
Encyklop. d. math. Wissensch. V, 13, § 18, S. 99—101 (1903.).

<sup>288</sup> Citat radnje prema Valentiner, l. c. <sup>6</sup>, S. 355; naslova radnje nigdje ne nalazim.



151. H. A. Lorentz, Elektrische Ströme in magnetischen Leitern.

Encyklop. d. math. Wissensch. V, 14, § 49, S. 235—238 (1903.)

152. H. A. Lorentz, Remarques au sujet d'induction unipolaire.

Collected Papers, vol. III, The Hague 1936, p. 177—179. — Prva publikacija: \* Arch. Néerl. (2) 9, 380—381, 1904.<sup>289</sup>

153. G. Mie, Elektrodynamik (Wien-Harms, Handb. d. Experim.-Physik, Bd. X/1), S. 271—273, 288—290.

154. G. R. Olshausen, Über die Unipolarrotation. Ann. d. Phys. (4) 6, 681—725, 1901.

155. L. Page a. N. I. Adams, Some Common Misconceptions in the Theory of Electricity.

The Am. Phys. Teacher 3, 51—58, 1934, p. 56—58.

156. \* G. B. Pegram, Phys. Rev. (2) 10, 591, 1917 (Cf.: J. T. Tate, Bull. Nat. Res. Council. 4, 75, 1922, p. 82, 91—92).

157. W. B. Pietenpol a. E. C. Westerfield, The Problem of Rotating Magnets.

Phys. Rev. (2) 38, 2280—2289, 1931.

158. H. Poincaré, La science et l'hypothèse, Paris 1908, p. 266—277.

159. \* E. Poirson, Rev. gén. électr. 44, 605, 1938.

160. \* Satyendra Ray, A Note on the Equivalent Shell of Circular Current.

Phil. Mag. (6) 39, 134—145, 1920 (Phys. Ber. 1, 1197, 1920; E. Buddé, ZS. f. Phys. 3, 287, 1920).

161. O. Rognley, The Electric Field of a Magnetized Spheroid Rotating about the Axis of Magnetization.

Phys. Rev. (2) 19, 609—614, 1922.

162. T. Schlömka, Zur Elektrodynamik des rotierenden Erdmagneten.

ZS. f. Geophysik 14, 285—296, 1938.

163. \* L. Slepian, Das Problem der unipolaren Induktion und die elektrischen Oberflächenspannungen auf rotierenden Magneten.<sup>290</sup>

Phys. ZS. d. Sowjetunion 3, 469—486, 1933 (Phys. Ber. 14, 1468, 1933; Journ. de phys. (7) 4 D, 481 D — 482 D, 1933).

<sup>289</sup> Naslov ove radnje iz Arch. Néerl. donosi Ann. Beibl. 29, 159, 1905 u prevodu, i tu glasi drukčije nego gore: »Bemerkungen zu dem Gegenstande der vorangegangenen Arbeit«.

<sup>290</sup> Naslov radnje i naslov časopisa citirani su prema Phys. Ber., l. c.

164. A. S t e f a n i n i, Rotazione in un polo magnetico attraverso un circuito chiuso.<sup>291</sup>

N. Cim. (6) 24, 29—33, 1922.

165. A. S t e f a n i n i, Sull' induzione unipolare.

N. Cim. (6) 24, 35—38, 1922.

166. \* W. F. G. S w a n n, Unipolar Induction (Abstract).

Phys. Rev. (2) 14, 537—538, 1920 (Phys. Ber. 1, 1502, 1920).

167. \* W. F. G. S w a n n, The Electric Field of a Rotating Magnetic Doublet.

Phys. Rev. (2) 15, 137, 1920 (Phys. Ber. 2, 208, 1921).

168. \* W. F. G. S w a n n, Electromagnetic Induction and Relative Motion.

Phys. Rev. (2) 15, 227—228, 1920 (Phys. Ber. 2, 404, 1921).

169. \* W. F. G. S w a n n, Unipolar Induction.

Phys. Rev. (2) 15, 365—398, 1920 (Phys. Ber. 1, 1503, 1920).

170. \* W. F. G. S w a n n, Note on Electromagnetic Induction and Relative Motion. A Rejoinder.

Phys. Rev. (2) 17, 242, 1921 (Phys. Ber. 2, 661, 1921; Journ. de phys. (6) 4 D, 884 D, 1923).

171. \* W. F. G. S w a n n, An Experiment on Electromagnetic Induction and Relative Motion.

Phys. Rev. (2) 17, 423—424, 1921 (Phys. Ber. 2, 891, 1921).

172. W. F. G. S w a n n, An Experiment on Electromagnetic Induction and Relative Motion.

Phys. Rev. (2) 19, 38—51, 1922.

173. W. F. G. S w a n n, The Fundamentals of Electrodynamics. Electrodynamics of Moving Media, Part I.

Bull. Nat. Res. Counc. 4, 1—74, 1922.

174. \* W. F. G. S w a n n, Electric Field Due to the Motion of Electromagnetic Systems.

Phil. Mag. (6) 45, 1191—1192, 1923 (Phys. Ber. 4, 1185, 1923).

175. A. S z a r v a s s i, Über die magnetischen Wirkungen einer rotierenden elektrisierten Kugel.

Wiener Ber. III, 1053—1065, 1902.

176. A. S z a r v a s s i, Über die unipolare Induktion.

Ann. d. Phys. (4) 23, 73—83, 1907.

177. J. T. T a t e, Unipolar Induction. Electrodynamics of Moving Media, Part II.

Bull. Nat. Res. Counc. 4, 75—95, 1922.

<sup>291</sup> Prema ispravku, koji je g. pisac proveo vlastoručno na primjerku, koji mi je poklonio, ima u naslovu radnje stajati *di* mjesto *in*, tako da naslov ima glasiti: *Rotazione di un polo magnetico*, i t. d.



178. \* C. Trettin, Der heutige Stand der Unipolarmaschine.

Dinglers polytechn. J. 328 (94), 129, 1913.

179. \* B. v. Ugrinoff, Die unipolare Gleichstrommaschine; Berlin 1910.<sup>291a</sup>

180. \* S. Valentiner, Elektromagnetische Rotation und unipolare Induktion; Karlsruhe 1904.

181. S. Valentiner, Bemerkung über Hoppes Vortrag »Zur Konstitution der Magnete«.

Phys. ZS. 6, 10—12, 1905.

182. S. Valentiner, Elektromagnetische Induktion (Geiger-Scheel, Handb. d. Physik, Bd. XV, Berlin 1927, S. 321—380), §§ 31—36, S. 351—356. — Takoder: Unipolarinduktion (Müller-Pouillet's Lehrb. d. Phys., 11. izd., Bd. IV/1, Braunschweig 1932, S. 566, § 7).

183. \* J. A. Vollgraff, Elektromagnetische Drehungen und unipolare Induktion.

Dissertation, Leiden 1903 (Ann. Beibl. 28, 198—199, 1904).

184. \* J. A. Vollgraff, Betrachtungen über die unipolare Induktion und die Fundamentalgleichungen des Elektromagnetismus.

Arch. Néerl. (2) 9, 340—380, 1904.<sup>292</sup> (Cf.: Lorentz, Coll. Papers, vol. III, p. 177).

185. \* J. A. Vollgraff, Kritik des vorangegangenen Artikels.

Arch. Néerl. (2) 9, 380, 1904.<sup>293</sup>

186. J. A. Vollgraff, Rotierendes Dielektrikum im magnetischen Felde.

Ann. d. Phys. (4) 27, 229—230, 1908.

187. V. Volterra, Italian Physicists and Faraday's Researches.

Nature 128, 342—345, 1931.

188. M. de Waha, Über unipolare Induktion.

ZS. f. Unterr. 14, 143—153, 1901.

189. R. H. Weber, Kraftlinien-Wanderung als Grundhypothese für die Maxwell-Hertz'sche Theorie.

Nat.-med. Ver. Verh. Heidelberg, N. F. 7, 623—628, 1903.

190. R. H. Weber, Zur Frage nach der Mitführung der Kraftlinien.

Phys. ZS. 6, 143, 1905.

<sup>291a</sup> Citirano prema F. Celeri, l. c. <sup>95b</sup>, p. 3.

<sup>292</sup> Naslov radnje naveden je prema Ann. Beibl. 29, 159, 1905.

<sup>293</sup> Naslov radnje naveden je prema Ann. Beibl. 29, 159, 1905.

191. R. H. Weber, Unipolarinduktion in Dielectricis. Nat.-med. Ver. Verh. Heidelberg, N. F. 8, 331—335, 1906.
192. J. A. Wilcken, Maxwell's Equations and the »Flux-cutting« Principle. Nature 141, 907, 1938.
193. J. Zeleny a. L. Page, Torque on a Cylindrical Magnet through which a Current is Passing. Phys. Rev. (2) 24, 544—559, 1924.
194. J. Zeleny a. L. Page, Note on »Forces on a Rigid Magnetized Conductor«. Phys. Rev. (2) 27, 470—473, 1926.
195. J. Zeleny a. L. Page, Problem of the Rotating Magnet. Phys. Rev. (2) 40, 299—306, 1932.
196. M. Zorn, Unipolarmaschine für kleine Spannungen und hohe Ströme. Elektrot. ZS. 61, 358—360, 1940.
197. (Zrn.), Das Haus der Entdeckungen auf der Pariser Weltausstellung. Elektrot. ZS. 59, 146, 1938.

## 2. Eksperimentalni uredaj.

Kod istraživanja unipolarne indukcije treba imati na umu ove tri činjenice, koje je Faraday utvrdio svom potrebnom točnošću:

a) Ako se magnet i vanjska žica, koja vodi k galvanometru, vrte istodobno istim smjerom i istom kutnom brzinom, galvanometar ne pokazuje struje.

Ovaj je nalaz Faraday nazvao općenitom i osnovnom činjenicom,<sup>294</sup> pa mu je zbog njegove važnosti posvetio osobitu brigu i u svojim se istraživanjima iz g. 1851. više puta navraća na nj, da bi ga utvrdio uz veću osjetljivost aparature.<sup>295</sup> O tumačenju ovog nalaza već je bilo govora.<sup>296</sup>

b) Rotacijom magneta ne inducira se struja u vanjskom zatvorenom krugu, koji je sasvim izvan magneta, bilo da taj krug miruje, a magnet rotira ili oboje zajedno rotiraju.<sup>297</sup>

<sup>294</sup> Faraday's Diary, § 11330: »This is a broad and fundamental fact«.

<sup>295</sup> Faraday, ibid., §§ 11335, 11336, 11584, 11591; Exp. Res., vol. III, Ser. XXVIII, §§ 3092, 3095, 3096, 3108, 3109; ibid., str. 404.

<sup>296</sup> Vidi napomene 83, 154, kritiku Exner-Czermakova pokusa i Prestonove prigovore.

<sup>297</sup> Faraday's Diary, §§ 11331, 11586; Exp. Res., ibid., §§ 3090, 3093, 3094.



c) Inducirana elektromotorna sila nezavisna je o veličini i o obliku plohe galvanometarskog kruga.<sup>298</sup> —

Iz Faradajevih i Nobilievih istraživanja izlazi, da je glavna značajna crta svih oblika unipolarne indukcije radijalna raspodjela napetosti prema rotacionoj osi. U homogenom magnetnom toku s komponentom gustoće  $\mathfrak{B}_n$  okomitom na ravninu trajektorije inducira se kod vrtnje u elementu polumjera  $dr$ , kome pripada linearna brzina  $v$ , elektromotorna sila

$$dE = \mathfrak{B}_n \cdot v \cdot dr$$

ili, ako je  $\omega$  kutna brzina

$$dE = \omega \mathfrak{B}_n r dr.$$

Integracijom između  $r_0$  i  $r$  imamo:

$$E = \frac{\omega}{2} \mathfrak{B} \cdot (r^2 - r_0^2). \quad (6) \quad ^{299}$$

Dakle je u homogenom magnetnom toku radijalna raspodjela elektromotorne sile inducirane rotacijom oko osi paralelne s pravcem magnetnog toka karakterizirana njezinim paraboličkim porastom.

Ako magnetni tok nije homogen nego je samo aksijalno simetričan prema rotacionoj osi, tako da je  $\mathfrak{B}_n = \varphi(r)$ , onda je

$$dE = \omega r \cdot \varphi(r) \cdot dr, \quad (7)$$

pa integracijom dobivamo, vodeći računa o promjeni sustava jedinica, jednadžbu (3) iz prijašnjeg poglavlja.

Iz (7) izlazi:

$$\mathfrak{B}_n = \varphi(r) = \frac{C}{r} \cdot \frac{dE}{dr} \quad (8)$$

Polazeći sa stanovišta, da je unutrašnjost magneta prostor s pojačanim indukcijonim svojstvima, moramo tome prostoru pripisati ista svojstva, koja pripisujemo silnicama izvan magneta. Specijalno mu moramo pripisati odbojno djelovanje među njegovim elementima u ravnini okomitoj na pravac magnetnog toka. Posljedica toga je savijanje i rasipanje silnica u magnetu izvan ravnine ekvatora. Pa ni u samoj ravnini ekvatora jednoliko magnetizi-

<sup>298</sup> Faraday's Diary, §§ 11356 do 11358, 11372 do 11374; Exp. Res., ibid., §§ 3099, 3107.

<sup>299</sup> K. T. Fischer, Verh. d. deutschen phys. Ges. 7, 434, 1905.

ranog cilindričkog magneta ne možemo očekivati točno homogenu raspodjelu unutrašnjeg magnetskog toka. Naprotiv se i tu mora računati s porastom njegove gustoće s povećavanjem udaljenosti od osi do površine magneta. To u ostalom pokazuju rezultati izračunavanja, koje je izveo Grotrian<sup>300</sup> na osnovu svojih mjerenja za magnetizirane željezne cilindre malenog omjera  $\frac{L}{2r}$  ( $L$  = duljina,  $r$  = polumjer cilindra). Tako za cilindar s omjerom  $\frac{L}{2r} = 3,004$  Grotrian nalazi u ravnini ekvatora porast gustoće od osi do površine za 4,6%, a za cilindar s omjerom  $\frac{L}{2r} = 5,52$  porast gustoće u istoj ravnini za 1%. Prema tome smijemo i u simetrično magnetiziranom cilindričkom permanentnom magnetu, koji rotira, za raspodjelu elektromotorne sile inducirane u ravnini ekvatora očekivati strminu veću od parabolične raspodjele.

Kako je jedan od ciljeva ovog istraživanja bio ispitati, koliko se pojavi unipolarne indukcije daću složiti sa širokim pogledom, kojim su na nju gledali Faraday i Nobili, trebalo je istražiti, koliko se raspodjela inducirane elektromotorne sile približuje paraboličnoj raspodjeli prema jednadžbi (6). Čudnovato je, da poslije Faradaya i Nobilia nije ništa dalje učinjeno na ispitivanju radijalne raspodjele inducirane elektromotorne sile, ako izuzmemo jedno Felicijevo istraživanje, o kojem će biti govora u idućem poglavlju. Valjda su tome bile razlogom samo osrednje vrijednosti koercitivne sile starijih čelika za magnete, pa su zbog toga i za unipolarnu indukciju upotrebljavani vitki magneti ( $\frac{L}{2r}$  veliko).

Prema tome je ovaj cilj istraživanja iziskivao upotrebu magneta velikog promjera, a praktični su razlozi nalagali dosta velik omjer između duljine i promjera. Kod izbora između permanentnog magneta i elektromagneta odlučivalo je više razloga. Za elektromagnet govorila je samo mogućnost da se lako ostvare veliki magnetski tokovi; međutim već opasnost kolebanja magnetskog toka za vrijeme jednog mjerenja, zbog mogućnosti kolebanja struje iz raznih razloga, govorila je protiv njega. Napose je protiv elektromagneta govorila bojazan od lutajućih struja iz uzvojnice, jer sam imao

<sup>300</sup> O. Grotrian, Ann. d. Phys. (4) 34, 1, 1911, S. 54, Tab. XIV; ibid., 36, 929, 1911, S. 952—953, Tab. P.



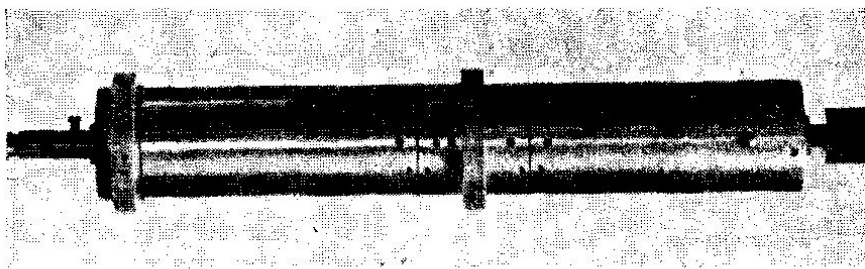
Drugi magnet složen je iz tri komada (sl. 2). Lijevo i desno su šuplji magneti  $A$  i  $C$ , duljine 9,2 cm svaki, a između njih je

učvršćen srednji umetak  $B$  duljine 3,7 cm. Šuplji magneti su provrtani uzduž osi. Promjer šupljina je 10,8 mm osim na unutrašnjim stranama kod  $a$  i  $b$ , gdje je šupljina proširena na 14 mm. Ova proširena šupljina nastavlja se u srednjem umetku skoro do njegova središta. Kroz središte ovog umetka prolazi vijak  $c$ , u kojemu je utaljen kraj aksijalne žice  $z$ . Srednji umetak je u daljini 7 mm od ekvatora i radijalno provrtan, pa je kroz ovu rupu (promjer 2,5 mm) provučena radijalna žica  $r$ , koja je u vijku  $c$  spojena s aksijalnom žicom  $z$ . Lijevi šuplji magnet  $A$  nosi na vanjskoj glavi ebonitni valjak  $g$  istog promjera, u kojemu je učvršćena lijeva osovina  $o_1$ , koja također ima na vrhu koničnu udubinu kao ležaj za vrh mesinganog drška. Prema tome osovina je izolirana od šupljeg magneta  $A$ . Ta je osovina provrtana, pa u nju ulazi kraj izolirane aksijalne žice  $z$ , koji je u njoj pritegnut vijkom.

Ovaj složeni magnet može se upotrebiti u izoliranom stanju, kako je prikazan u sl. 2, ili u vodljivom stanju. U izoliranom stanju sva su tri dijela međusobno izolirana. Prema tome u tom stanju imamo jedini put struje u magnetu  $pczo_1$ . Za izolaciju služe najprije ebonitni umeci  $a$  i  $b$ , koji su vijcima  $v$  učvršćeni na jednoj strani u srednjem umetku, s druge strane u šupljim magnetima. Lijevi ebonitni umetak  $a$  prošupljen je, pa kroz njega ide aksijalna žica  $z$  iz vijka  $c$ . Izolacija među glavama srednjeg umetka i glavama šupljih magneta izvedena je pomoću prstenova  $i$  od celuloida debljine 0,2 mm. Da bi se u ovako sastavljenom magnetu postigla stalnost magnetskog toka, trebalo je pobrinuti se za njegovu mehaničku čvrstoću, jer ga vijci  $v$  ne stežu toliko, da bi pojedini dijelovi bili međusobno posve nepomični. Zbog toga su celuloidni prstenovi zalijepljeni i uz srednji umetak i uz šuplje magnete. Najprije je na unutrašnjim glavama šupljih magneta i na glavama srednjeg umetka postepenim nanašanjem i sušenjem napravljena kožica zapon laka debljine 0,1 do 0,2 mm, koja čvrsto prijanja uz podlogu. Zatim su na te kožice pomoću acetona nalijepljeni celuloidni prstenovi i magneti su međusobno zalijepljeni. Dok su celuloidni sastavci još bili meki, pritegnuti su vijci  $v$ . Da bi se svi dijelovi bolje slijepili, dobro je naknadno nanijeti izvana po koju kap zapon laka, koji polako prodire unutra i ispuni eventualne šupljine. Magnet je ostavljen u vertikalnom položaju da se suši, pa su nakon 8 dana postignute izolacije bolje od  $10^{10} \Omega$ . Tako osušeni magnet toliko je mehanički čvrst, da su sva tri dijela među-



sobno nepomična, pa se uz pažljiv postupak tako održi kroz neko 4 sedmice. Međutim se pod djelovanjem acetona na slijepljenim plohama polako stvara tanki sloj rde, pa se celuloid mjestimice odlijepi i sastav olabavi. Ponovnim uvođenjem malenih količina zapon laka i sušenjem opet se postizava prijašnja čvrstoća.<sup>301</sup> — Tako složeni magnet u izoliranom stanju pokazuje snimka u sl. 3 (bez radijalne žice).



Sl. 3. Snimka složenog magneta u izoliranom sastavu, bez radijalne žice  $r$ .

Za sastavljanje ovog magneta u posve vodljivom stanju izrađeni su umeci od mesinga iste veličine kao ebonitni umeci  $a$  i  $b$ . Između glava šupljih magneta i srednjeg umetka umetnuti su prstenovi od mesinganog lima debljine 0,2 mm, pa su magneti preko njih na površini zataljeni. U šupljinu na lijevoj glavi lijevog šupljeg magneta utisnut je kod  $d$  kratak mesingani čep, koji je na unutrašnjoj strani spojen s aksijalnom žicom  $z$ , a na njegovom vanjskom kraju pritaljena je žica, koja prolazi kroz ebonitnu glavu  $g$  u šuplju osovinu  $o_1$ , gdje je pritegnuta vijkom.

I ovaj magnet ima u ekvatoru tri udubine za pričvršćivanje istog ekvatorijalnog prstena, koji služi za puni magnet. Taj prsten ima širinu 7 mm, a debljinu 4,7 mm. Namješta ga se samim natezanjem vijaka, koji ulaze u udubine, pa stoji posve nepomično. Vijci su cilindrički, t. j. nemaju raširenih glava. Osim ovog ekvatorijalnog prstena ( $p$ ) upotrebljavan je kod pokusa s radijalnom žicom  $r$  drugi prsten ( $p_1$ ), koji se na ekvatoru namješta izolirano. Taj prsten ima isti vanjski promjer kao  $p$  (49,4 mm), a unutrašnji promjer mu je za 2 mm veći, tako da između njega i magneta ostaje praznina od 1 mm. Da ga se namjesti, ekvator magneta oblijepljen je celuloidnom vrpcom visine 1 mm, pa je prsten pritegnut vijcima iznad ekvatorijalnih rupica. Da vijci ne bi probili celuloida,

<sup>301</sup> Naknadno se pokazalo da je u opće lijepljenje zapon lakom bolje, jer se njim zalijepljeni magnet održao bez popravka nekoliko mjeseci.

u svaku maticu uvučen je kratki komadić kaučuka, koji kod pritizanja čini elastični zaštitni sloj između vijka i celuloida.

Prsten  $p_3$  na ebonitnoj glavi  $g$  ima na strani okrenutoj prema magnetu kružnu stepenicu visine 1 mm. Ova služi tome, da bi se prema potrebi napravio spoj između magneta i prstena  $p_3$ . U tu svrhu dolazi između  $p_3$  i magneta jedan mesingani obruč, koji se vijcima pritegne uz magnet, a na strani prema glavi  $g$  ima kružni žlijeb, koji pristaje uz spomenutu stepenicu. Ako sada kod magneta u izoliranom stanju izolaciju  $i$  pokrijemo uskom prugom tankog mesinganog lima (0,2 mm), prsten  $p_3$  žicom spojimo s osovinom  $o_1$ , a aksijalnu žicu  $z$  izolirano uvučemo u šupljinu magneta,<sup>302</sup> imamo spoj ekvatora s osovinom kroz samu površinu magneta (»površinski spoj«). Uklonimo li sada spomenuti mesingani obruč, a u šupljinu na lijevoj glavi šupljeg magneta  $A$  utisnemo spomenuti mesingani čep,<sup>303</sup> imamo spoj, koji od ekvatora vodi iznad izolacije  $i$ , te se nastavlja kroz unutrašnjost šupljeg magneta  $A$  (»unutrašnji spoj«). Brzi prelaz od površinskog spoja na unutrašnji da se izvesti tako, da mesingani čep ostavimo u glavi šupljeg magneta, ali aksijalnu žicu, koja od njega vodi u osovinu  $o_1$ , izoliramo bužirnom cijevčicom. Uklonimo li mesingani obruč, izvučemo bužirnu cijevčicu, pa aksijalnu žicu stegnemo vijkom, imamo unutrašnji spoj.

Propisano područje temperatura kaljenja za ovu vrst kobalt-nog čelika leži između 850 i 900° C. Između tih graničnih temperatura znatno se mijenjaju koercitivna sila i remanencija. Zato je za kaljenje odabrana poprečna sredina tog područja 880° C. Ohlađuje se u ulju. Radionica državnih željeznica u Zagrebu ima specijalne peći za kaljenje, pa je dozvolom uprave radionice kaljenje tamo obavljeno.<sup>304</sup> Temperatura kaljenja kontrolirana je sa dva pirometra. Poslije kaljenja su površine magneta, a naročito sve kontaktne plohe, pažljivo očišćene od tvrde kore, koja se kod toga bila na njima nahvatala.

Magnetiziranje je obavljano u unutrašnjosti jake uzvojnice dobivene spajanjem uzvojnica R u h m k o r f f ova elektromagneta

<sup>302</sup> Za izolaciju služi staklena cijev, koja je u tu svrhu uvučena u šupljinu magneta.

<sup>303</sup> Aksijalna žica  $z$  ostaje dakako i kod toga izolirana.

<sup>304</sup> Čast mi je i na ovom mjestu zahvaliti upravi iste radionice na uči-



uz jakost struje 50 A, rijeđe 40 A. Da bi se postiglo aksijalno simetrično magnetiziranje, izrađen je cilindrički drveni šuplji umetak od dva dijela, koji točno ispunja šupljinu uzvojnice, pa se u nj umeće magnet. Okretanjem magneta u ovom ležaju za vrijeme magnetiziranja postignuto je sigurno posve simetrično magnetiziranje. Maksimalni postignuti magnetski tokovi iznosili su 27490 maksvela za puni magnet, a 21620 maksvela za šuplji magnet. Ispitivanje stalnosti pokazalo je kod punog magneta, da se njegov magnetski tok, koji je izmjeren neposredno poslije magnetiziranja, nakon 8 dana umanjio samo za 0,33%. Zbog toga je bilo suvišno magnete svaki put napose stabilizirati umjetnim starenjem, tim više, što je uspoređivanje rezultata pokusa svaki put kontrolirano ponovnim mjerenjem magnetskog toka.

Ovako veliki magnetski tokovi bili su potrebni, da bi se uz upotrebu galvanometra velike osjetljivosti omogućila mjerenja uz malene frekvencije vrtnje magneta. Ovim su snižene na najmanji iznos sve smetnje i pogreške. To vrijedi u prvom redu za termostruje na skliznim kontaktima, koje mogu najviše smetati. Težnja da se izbjegnu velike frekvencije vrtnje uplivala je i pri izboru između galvanometarskog i elektrometričkog mjerenja u prilog prvome.

Aparatura za okretanje magneta vidi se na sl. 16. Primarni je rotor, kojega se frekvencija mjeri i održava konstantnom, motor stalne struje. Njegova se vrtnja kaučukovim remenom prenosi na dvostepenu zupčastu tranzmisiju, a s ove kožnatim remenom na drveni aparat za vrtnju magneta. Kad se upotrebi cijela zupčasta tranzmisija i veća remenica na drvenom aparatu, postizava se glavni prenosni omjer 50 : 1.<sup>305</sup> Drugi prenosni omjeri istog reda veličine mogli su se postići dijelom izmjenom remenica na motoru i na zupčastoj tranzmisiji, dijelom prelazom na manju remenicu drvenog aparata. Manji prenosni omjeri, t. j. veće frekvencije vrtnje magneta, mogle su se do potrebe dobiti izravnim prenosom na srednji kotač zupčaste tranzmisije. Kod elektrometričkih mjerenja vrtnja je prenošena izravno na manju remenicu drvenog aparata za vrtnju. Pogonska struja za motor uzimana je iz zavodske akumulatorske baterije. Brojevi okreta kod prenosa preko zupčaste tranzmisije mjereni su primarno na motoru stroboskopski pomoću

<sup>305</sup> Promjena remena može uplivati na prenosni omjer u desetinkama.

tinjalice na gradskoj napetosti. Na taj način opseg kolebanja frekvencije vrtnje magneta odgovara neznatnom opsegu kolebanja frekvencije gradske struje. Prema tome dale su se stroboskopski ustanoviti primarne frekvencije 1000, 1200, 1500, 2000 i 3000 okreta/min.; ovima odgovaraju za prenosni omjer 50 : 1 frekvencije vrtnje magneta  $\frac{1}{3}$ ,  $\frac{2}{5}$ , 0,5,  $\frac{2}{3}$  i 1,0 okreta/sec. Prenosni su omjeri izravno određivani zapornom urom<sup>306</sup> iz brojenja okreta magneta pri konstantnoj vrtnji motora. Pojedinačni otkloni galvanometra opažani su uvijek kod potpunog mirovanja stroboskopske slike.

Kod izgradnje aparature bila je obraćena pažnja na to, da se posve uklone bilo kakvi željezni dijelovi iz neposredne blizine magneta. Stalak, koji je nosio mesingani držak, koji upire u konični ležaj na lijevoj osovini magneta, sav je bio od mesinga. Od mesinga je i osovina drvenog rotacijonog aparata. Daljina motora od bližeg pola magneta iznosila je 90 cm (vidi sl. 16). Kod pokusa s velikom pločom na magnetu najbliže željezo bio je okvir, na komu je učvršćena zupčasta tranzmisija, u daljini 50 cm od bližeg magnetskog pola. Kod drugih pokusa stalak, koji je nosio doticaljku u ekvatoru, bio je od mesinga, ali njegovo podnožje bilo je od željeza (daljina 25 cm od magneta). Doticaljku na osovini nosio je kratak mesingani štap, koji je bio učvršćen uz spomenuti glavni stalak od mesinga; pri tom su dakako sva dodirna mjesta između doticaljke i štapa bila izolirana (celuloid).

Da bi se izbjegli trešnja i savijanje glavnog mesinganog stalka kod vrtnje magneta, njegov je vrh vezan aluminijskim štapom uz dvostruki aluminijski štap, koji je bio pričvršćen na kraju stola.<sup>307</sup> Na ovaj dvostruki aluminijski štap vezan je i vrh stalka, koji je nosio ekvatorijalnu doticaljku. Međutim kod pokusa s mesinganom pločom na glavi magneta dolazilo je zbog neizbježive neznatne aksijalne nesimetrije u raspodjeli mase ploče do trešnje cijele aparature, ako je vrh glavnog mesinganog stalka bio vezan. Pokazalo se je, da je u ovom slučaju bolje dati štapu stalka stanovitu slobodu, pa se tada štap ritmički savijao s amplitudom 2 do 3 mm u visini osi magneta. U tom je slučaju i horizontalni aluminijski štap, po kojem je doticaljka na ploči bila premješтана uzduž njezinog hori-

<sup>306</sup> Zaporna ura uspoređena s vremenskim signalom pokazuje tako malenu razliku, da se ova može posve zanemariti.

<sup>307</sup> U sl. 16 taj dvostruki štap nosi gornje kolutove K i K<sub>1</sub>. Poprečni spojni štapovi su u snimci skinuti radi bolje preglednosti slike.



zonalnog polumjera, bio izolirano pričvršćen uz štap glavnog stalka, pa je doticaljka slijedila kolebanja i njezin trag na ploči opet je bila kružnica. — Drveni rotacioni aparat i svi stalci bili su daskama i drvenim škripcima pričvršćeni uz stol.

Naročito je trebalo paziti na to, da se umanje do najmanje mjere parasitne elektromotorne sile, koje nastaju na skliznim kontaktima između doticaljki i ploha, koje rotiraju. Te ćemo elektromotorne sile po najznatnijoj među njima u kratko zvati termoelektromotornim silama. Prvobitna namisao, da ih se čim većma ukloni upotrebom doticaljke od iste kovine, od koje je ploha, koje se doticaljka dotiče, nije se dala općenito provesti. Najprije doticaljkom od čeličnog lima *MK5* poliranom do zrcalnog sjaja, naslonjenom izravno na magnet, nijesu se nikako dali dobiti suvisli rezultati. Dodirna ploha prevuče se kod vrtnje uskoro vrlo tankom kožicom nekog crnog praha, pa od tada otkloni vrlo nepravilno kolebaju za 10 do 15%. Kod toga ne pomaže ni upotreba pomagala, koje je preporučio i upotrebljavao Lorenz,<sup>308</sup> naime da se dodirna ploha namaže vrlo tankim slojem ulja ili masti. Ovo se sredstvo čak pokazalo nepodesnim, jer je izvorom novih nesigurnosti, pa ograničuje usporedljivost pojedinih nizova mjerenja i kod mesinganih doticaljki, naročito kad se radi s galvanometrom malenog otpora. — Razlog spomenutim nepravilnim kolebanjima kod upotrebe doticaljke od lima *MK5* razjašnjen je kasnije kod isto tako neuspjele upotrebe nikaljne doticaljke na nikaljnomo limu. Tanki feromagnetički prah, koji nastaje na mjestu dodira feromagnetičke doticaljke s isto takvom plohom, prianja uz plohu magneta, pa stvara tanki sloj promjenljivog otpora, koji trajno ostaje između obiju površina. Pomisao, da se plohe, na koje će dolaziti doticaljke, pobakre i posrebrne, nije se dala provesti zbog toga, što kobaltni čelik *MK5* sadrži 5 do 5,5% kroma, pa se ne da elektrolizom prevući bakrenom kožicom, koja bi čvrsto prianjala uz podlogu.

Premda bi primjena doticaljke izravno na površinu magneta imala u mnogo slučajeva nesumnjivih prednosti, jer bi otpale korekture elektromotorne sile na prstenu, moralo se poslije ovih neuspjeha od nje odustati i vratiti se na stari Faradayev i Weberov način, pa je u ekvatoru upotrebljavan spomenuti mesingani prsten, a po njemu se sklizala doticaljka od mesinga od prilike iste vrsti. Uz spomenute malene frekvencije vrtnje uspjelo je tim na-

<sup>308</sup> I. Lorenz, Wied. Ann. 25, 1, 1885.

činom sniziti otklone od termostruja na 1 do 2%. Posebna je pak prednost mesingane doticaljke na mesinganoj plohi u tome, što su termoelektromotorne sile skoro nepromjenljive. Zbog toga se njihov upliv više-manje posve eliminira, ako se magnet vrta najprije jednim, pa suprotnim smjerom, pa se uzmu aritmetičke sredine obaju srednjih otklona. Tako je postupano u svim mjerenjima. Napokon se pokazalo, da ovo dobro svojstvo mesingane doticaljke ostaje u velikoj mjeri i onda, kad je bilo potrebno, da je se upotrebi izravno na čeliku ili na niklju, premda su se otkloni od termostruja kod toga penjali do 10 i 15 dijelova ljestvice.

U svim slučajevima se pokazalo, da stalnost termostruja u velike zavisi o stalnosti malenog pritiska, kojim doticaljka upire u rotirajuću plohu. Zbog toga su sve doticaljke, osim jedne specijalne, koja će biti opisana u idućem poglavlju, bile građene na slijedeći način. Na dršku od suhog tvrdog drveta pričvršćena je kratka pruga elastičnog mesinganog lima debljine 0,5 mm, koja je obično bila dva puta pravokutno svinuta. Na nju je nataljen kao prava doticaljka 4 do 5 cm dug komad tvrdog mesinganog lima debljine 2 mm. Doticaljke na osovinu magneta bile su u svrhu veće dodirne plohe kružno svinute. Doticaljke, koje su se upotrebljavale za dodir na unutrašnjem rubu mesinganog prstena u ekvatoru, morale su osim elastičnosti okomito na dodirnu plohu imati i dosta elastičnosti u smjeru paralelnom sa dodirnom plohom, da ne bi celuloidna pruga, kojom je tu bio omatan magnet, bila izložena prevelikom tlaku. Zato je kod takvih doticaljki pruga elastičnog mesinga bila duga 8 do 10 cm, pa je bila uzdužno tordirana za 90°. Na rubu debljeg mesinganog lima, koji je nataljen na tu prugu, izrađena je onda dodirna ploha u obliku zuba prosječne dužine 2,5 mm, debljine 0,3 mm, koji je uzdužno zakrivljen s polumjerom zakrivljenosti pobočja magneta. — Drveni držak doticaljke bio je celuloidom izoliran od stezaljke Bunsenova stalka.

Upotrebljavana su dva galvanometra sa zrcalom. Naročito kod pokusa sa velikom mesinganom pločom, gdje je bilo potrebno, da galvanometar brzo postigne konačni otklon, da ne bi doticaljka urezala u ploči predubok zarez, upotrebljaván je galvanometar s malenim prigušenjem, koji se brzo namješta. Zbog njegova malenog otpora (50  $\Omega$ ) otkloni su znatno podvrgnuti promjenama otpora na dodirnoj plohi, pa znatno kolebaju. Međutim dao se uvijek naći zgodan pritisak doticaljke, da amplitude kolebanja



nijesu prelazile ni na rubu mesingane ploče  $\pm 2\%$ . Napokon je upliv kolebanja umanjen velikim brojem opažanja, od kojih je uzeta srednja vrijednost. Galvanometar ima magnetski shunt, kojim mu se može regulirati osjetljivost. Zbog toga nije upotrebljavan u mjerenjima, od kojih se tražila usporedivost s drugim nizovima mjerenja. Poprečna osjetljivost bila mu je 1 mm za  $1 \cdot 10^{-6}$  volta (daljina ljestvice 110 cm). — U najvećem dijelu mjerenja upotrebljavan je galvanometar s velikim prigušenjem, s unutrašnjim otporom  $102 \Omega$ . Granični mu je otpor  $910 \Omega$ , a upotrebljavan je s otporom  $296 \Omega$  (300 B. A. U.) u krugu, tako da je još uvijek aperiodičan, ali se ne skliže. Promjene otpora na skliznim kontaktima skoro iščezavaju prema otporu kruga, pa su tim kolebanja otklona bila snižena na manje od  $\pm 0,5\%$ . Osjetljivost ovog galvanometra sa  $296 \Omega$  u krugu iznosi pri istoj daljini ljestvice  $1,29 \cdot 10^{-6}$  volta za 1 mm otklona. — Udaljenost između galvanometra i bližeg pola magneta iznosila je 1 m.

Magnetski tok mjeren je Grassotovim fluksmetrom (1 dio ljestvice = 10.000 maksvela) pomoću uske dvoslojne uzvojnice od 20 uzvoja tanke žice. Promjer uzvojnice iznosio je 44 mm. Gdje je trebalo mjeriti magnetski tok između jednog i drugog niza mjerenja preko mesinganih prstenova na magnetu, upotrebljavana je uzvojnica od 20 uzvoja s promjerom 65 mm. Pokusima je određena korektura, pa su mjerenja izvedena ovom uzvojnicom korigirana na promjer 44 mm.

O Dolezalekovu elektrometru, kojim su izvedena elektrostatička mjerenja, bit će govora kasnije.

Pretpokusi su izvedeni u prvoj polovici godine 1938., a mjerenja pomoću konačne aparature izvedena su kroz godine 1939. i 1940.

Cijela aparatura izrađena je u radionici fizikalnog zavoda sveučilišta u Zagrebu, osim velike mesingane ploče iz idućeg poglavlja. Zavodski mehaničar g. Zvonimir Kudelić izradio je magnete s velikom točnošću usprkos velike tvrdoće i žilavosti kobaltnog čelika, kao i ostale dijelove aparature. On mi je također pomagao kod najvećeg dijela dugotrajnih mjerenja regulirajući frekvenciju vrtnje motora neobičnim strpljenjem i pažnjom. Na svemu mu i na ovom mjestu od srca zahvaljujem.

### 3. Indukcija u ploči na čelu magneta i na njegovom ekvatoru.

Kako je prikazano u povijesnom pregledu, pokusi o indukciji u ploči na čelu magneta ili ispred njega bili su kod Faradaya polazna točka u njegovom istraživanju unipolarne indukcije. On se na njih navraćao i kasnije. U istraživanjima iza Faradaya i Webera mnogo se radilo s jednom ili dvije kovne ploče (mesingane ili bakrene), koje su na osovini bile pričvršćene ispred čela magneta. Takvi aparati bili su u Njemačkoj većinom Fessellova rukotvorina;<sup>309</sup> ali čini se, da je misao potekla od Beera.<sup>310</sup> Kod Wiedemanna je obrađeno izračunavanje jakosti inducirane struje za ovakvu kombinaciju ploča u zavisnosti o njihovoj daljini od pola i o daljini skliznih kontakta na njima od rotacione osi.<sup>311</sup> Već i u Plückerovim pokusima dolaze na glavi i u ekvatoru magneta mesingane ili bakrene ploče; ali one imaju većim dijelom samo ulogu vodiča.<sup>312</sup> Jednu kovnu ploču, koja rotira u izvjesnoj daljini od pola magneta, obradio je računski Edlund.<sup>312a</sup>

Felici je u svojoj trećoj radnji o elektrodinamskoj indukciji<sup>313</sup> objavio svoja mjerenja na kovnoj ploči pričvršćenoj koaksijalno na osovini magneta u daljini  $r$  cm od njegove čone plohe. On drži oba sklizna kontakta (doticaljke), koja su spojena s galvanometrom, u stalnoj međusobnoj udaljenosti. Na taj način njegovi otkloni daju približno promjenu elektromotorne sile  $\Delta E$  na  $r$  cm uzduž polumjera ploče. On nalazi, da  $\Delta E$  s porastom udaljenosti od osi općenito opada, kod neke udaljenosti padne na nulu, a u još većim udaljenostima postane negativna.<sup>314</sup> Primjenom svoje opće indukcijone jednadžbe, izvedene sa stanovišta spomenute hipoteze. o posebnoj elektromotornoj sili na skliznim kontaktima, on izvodi matematički izraz za  $\Delta E$ , za koji nalazi, da je u skladu s opažanjima.<sup>315</sup> I Edlund<sup>312a</sup> je našao izraz za položaj »neutralnog kruga« na ploči.

<sup>309</sup> Müller-Pouillet's Lehrb. d. Phys., Bd. III, 9. izd. (1888.—1890.), str. 711—713.

<sup>310</sup> A. Beer, l. c. 76, S. 187.

<sup>311</sup> G. Wiedemann, l. c. 3, Bd. II/2, S. 80—81.

<sup>312</sup> J. Plücker, l. c. 73.

<sup>312a</sup> E. Edlund, Phil. Mag. (5) 6, 289, 1878, p. 295—296.

<sup>313</sup> R. Felici, l. c. 75; Ostwald's Klass. Nr. 109, S. 88—93.

<sup>314</sup> Iz Felicievih podataka (S. 19) razabira se, da je njegova ploča imala polumjer veći od 19 cm.

<sup>315</sup> Felici, ibid., § 66, S. 100—101.



Veća važnost pripada istraživanju raspodjele elektromotorne sile na ravnoj ploči namještenoj u ekvatorijalnoj ravnini magneta. Vanjski magnetski tok presjeca takvu ploču u svima točkama okomito. Dakle su u ovom pogledu prilike na njoj iste kao u ekvatorijalnom presjeku magneta obzirom na njegov unutrašnji magnetski tok, izuzevši dakako raspodjelu gustoće toka. Vanjski dio ekvatorijalne ravnine od površine magneta do beskonačnosti ekvivalentan je s unutrašnjim dijelom te ravnine od površine do osi. Pomoću diferencijalne krivulje raspodjele elektromotorne sile na takvoj ploči dobiva se relativna raspodjela gustoće vanjskog magnetskog toka u ekvatorijalnoj ravnini prema jednadžbi (8).

Zanimivo je, da Faraday spominje takvu ploču u ekvatoru samo jedan put, i to nuzgredno, u svom Dnevniku (§ 11408, 5. VIII. 1851.). On tu donosi sliku cilindričkog magneta, kojemu je iz ekvatora izrasla uska ploča, od koje vodi žica na jednu spojku galvanometra, pa kaže ovako: »Ako promatramo magnet, koji se vrti, sa njegovom vanjskom žicom, pa zamislimo, da je njegov ekvatorijalni dio proširen vani, onda ono ploče, koliko je ima izvan magneta, mora gibajući se s njim težiti, da u njemu teku struje upravljene *smjerom suprotnim* nego struje u dijelovima te ploče unutar magneta«. <sup>316</sup> Odavle se ne da ustanoviti, da li je Faraday takav pokus zaista i izveo, ili ga je samo zamislio. Svakako ga ne spominje ni u XXVIII. ni u XXIX. nizu, kao ni u prikazu ovih radnja. Vjerojatnijim mi se čini, da Faraday nije pošao kod ovog pokusa dalje od zamisli, jer mu on nije bio ni potreban. On je vanjski magnetski tok izjednačivao s unutrašnjim magnetskim tokom drugim putem: svaki polumjer ekvatora njemu je ekvivalentan s ma kojom vanjskom krivuljom od ekvatora do osi magneta izvan jednog pola. <sup>317</sup>

Ni u kasnijim radnjama o unipolarnoj indukciji skoro da nema eksperimentalnih istraživanja elektromotorne sile na ekvatorijalnoj ploči. Wiedemann je dao formulu za jakost struje inducirane u takvoj ploči u zavisnosti o udaljenosti skliznog kontakta od osi magneta kao specijalni slučaj spomenute formule za dvije

<sup>316</sup> Faraday's Diary, § 11408: »If we consider a revolving magnet with its external wire and imagine its equatorial part to be extended outside, then so much of the disc as is outside the magnet must, in moving with it, tend to have currents set up in it in the contrary direction to those in the parts within the magnet.« — Kurziv sam ja potcrtao.

<sup>317</sup> Faraday, *ibid.*, § 11410; Exp. Res., vol. III, Ser. XXVIII, § 3100.

koaksijalne ploče.<sup>318</sup> E d l u n d je obradio ploču ekvatorijalno namješrenu prema magnetu, koji rotira ekscentrički (P l ü c k e r o v pokus).<sup>318a</sup> K o c h je upotrebljavao dvije bakrene ploče, od kojih je veća ( $r = 113,9$  mm) bila nepomična u ekvatoru magneta, dok se druga dala pomicati uzduž magneta, pa je mjerio elektromotorne sile između njih.<sup>319</sup> Istom posljednjih godina su C r a m p i N o r g r o v e izveli neka istraživanja pomoću velike mesingane ploče, koja se dala pričvrstiti ili u ekvatoru cilindričkog magneta ili u kojem drugom položaju na njemu. Mjerenjem elektromotorne sile između ekvatora magneta i jedne točke na ploči oni mjere vanjski magnetski tok, koji je kod rotacije obuhvaćen između ovih dviju točaka. To se da izvesti u ekvatoru ili u kojoj drugoj ravnini okomitoj na os magneta, pa će se dobiti podaci i o raspodjeli magnet-skog toka uzduž magneta. Obrnuto, oni snuju i mjerenje frekvencije vrtnje pomoću ovakve ploče na magnetu u rotaciji. U radnji nema podataka o veličini ploče. Sudeći po veličini magneta u njihovoj sl. 11, u koliko bi njegove dimenzije odgovarale magnetu opisanom u odsjecima 2. i 14. njihove radnje, mogao je promjer ploče iznositi nekih 26 cm. Pisci samo ocrtavaju metodu u glavnim crtama, a ne donose nikakvih mjerenja.<sup>320</sup> —

Mesinganu ploču učvršćenu na punom magnetu upotrebio sam za istraživanje raspodjele inducirane elektromotorne sile u ravnini ekvatora i u ravnini čela magneta. Ploča je izrađena tiskanjem iz tvrdog mesinganog lima debljine 2 mm, pa je polirana do zrcalnog sjaja. Promjer joj je  $2r = 47,8$  cm; teži 2,99 kg\*. Sl. 4 pokazuje ju u ekvatorijalnom položaju na magnetu.<sup>321</sup> Učvršćuje se na magnetu pomoću mesingane ogrlice, koja je vijcima pritegnuta uz unutrašnji rub ploče i onda uza nju zataljena. Za pričvršćivanje uz magnet služile su spomenute plitke konične rupice u blizini ekvatora i u blizini glave magneta. U njih ulaze iz ogrlice vrhovi jakih vijaka, pa pritezanjem ovih stoji ploča na magnetu posve nepomično. Vrhovi vijaka su jednako konički obrađeni kao rupice, tako da već oni čine široke kontakte između magneta i ploče. Daljine rupica od ekvatora i od čela magneta tako su odmjerene, da u ekvatori-

<sup>318</sup> W i e d e m a n n, l. c., S. 81.

<sup>318a</sup> E d l u n d, l. c. <sup>318a</sup>, p. 296—297.

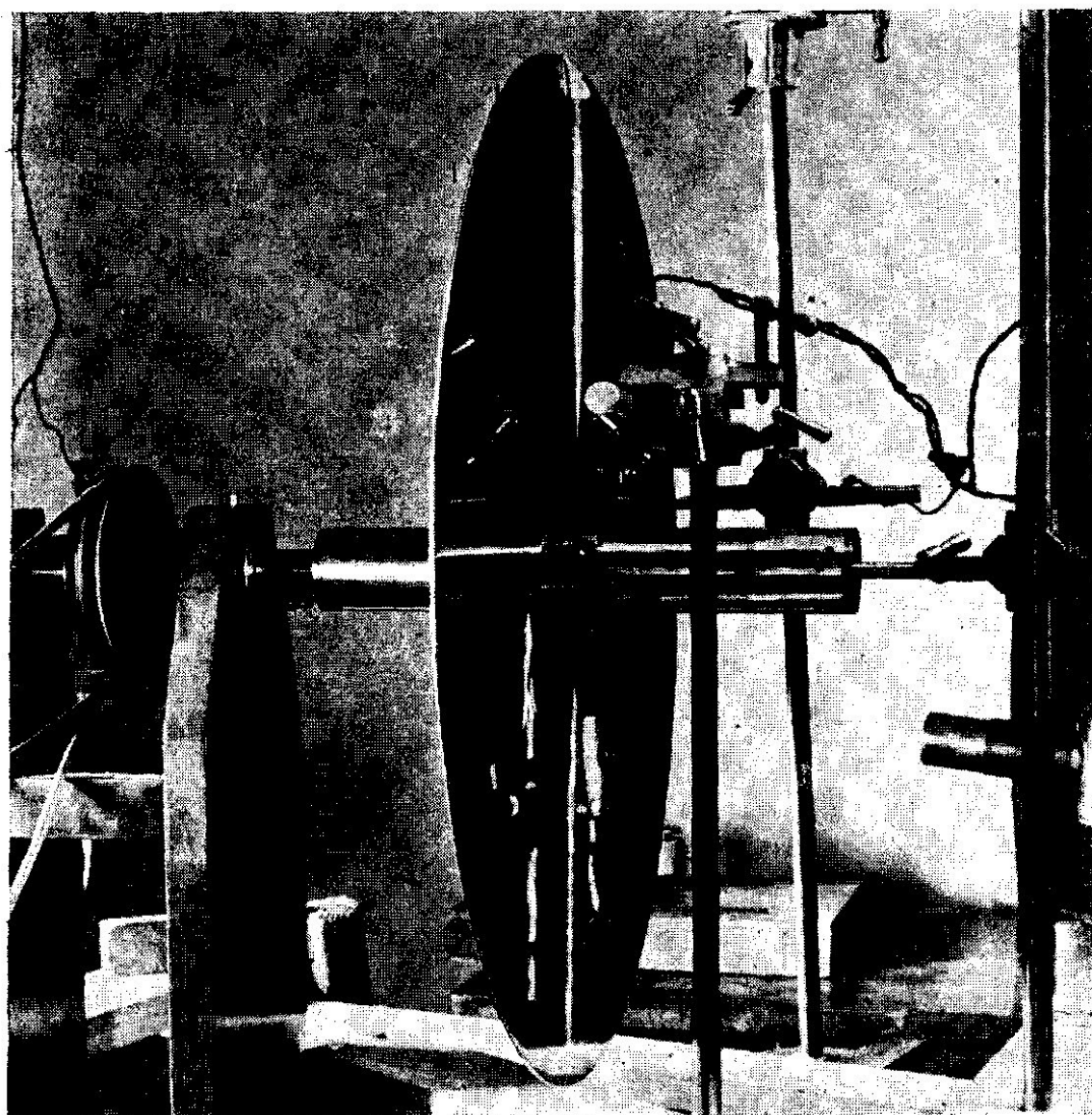
<sup>319</sup> F. K o c h, l. c. <sup>103b</sup>.

<sup>320</sup> C r a m p a. N o r g r o v e, l. c. <sup>247</sup>, p. 490.

<sup>321</sup> Ploča u snimci izgleda crna, jer se u njoj, u svrhu povećanja kontrasta, odrazuje crna ploha, koja se djelomično vidi na desnom rubu slike.



jalnom položaju strana ploče, koja je okrenuta prema ogrlici, leži u ekvatoru, a u položaju na glavi ravna ploha ploče leži u ravnini čela magneta. Zbog opisane nesigurnosti kontakta doticaljke sa kobaltnim čelikom bila je pribijena uz čelo magneta mesingana pločica debljine 3 mm, pa su kod čeonog položaja velike ploče mjerenja za  $r < 2$  cm nastavljena na toj pločici.<sup>322</sup>



Slika 4. Ploča na magnetu u ekvatorijalnom položaju.

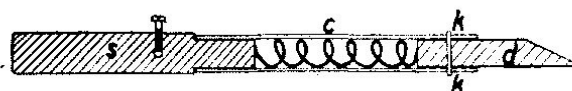
Unutrašnji promjer ogrlice ploče iznosi 40,7 mm; t. j. između nje i magneta ostaje praznina od 0,35 mm. Tim je omogućeno, da se ploča može do potrebe namjestiti na magnetu izolirano. U tom slučaju omotan je magnet preko rupica slojem celuloida debljine

<sup>322</sup> Toj pločici pripada parabolički dio krivulje 3 u sl. 6 i krivulja u sl. 7.

0,3 mm. Kod pritezanja vijaka i ovdje je celuloid bio zaštićen komadićima kaučuka, koji su uvučeni u matice, da ga vrhovi vijaka ne bi probili. U redovitoj upotrebi ploča je bila vodljivo spojena s magnetom, pa su u svrhu dobrog kontakta na širokim plohama bili između magneta i ogrlice utisnuti široki komadi tankog mesinganog lima.

Zbog načina, kako je izrađena, ploča nije posve ravna, a ne stoji ni posve točno okomito na unutrašnjoj izvodnici ogrlice. Ipak se natezanjem spomenutih vijaka za pričvršćivanje uz magnet i utiskivanjem spomenutih komadića lima pod zgodnom stranom ogrlice dala izbačenost ploče iz okomite ravnine svesti za krajnji njezin rub na manje od 6 do 8 mm. U takvim prilikama obične doticaljke iz mesinganog lima bile bi posve nepouzidane, a trajektorije na ploči ne bi bile krugovi. Da bi se dobio elastičan dodir s pločom u krugu određenog polumjera, kome je središte u osi magneta, izrađene su posebne elastične doticaljke prema shemi u sl. 5. Doticaljka *d* nataljena je na elastičnom peru od mesinga, koje se nalazi u kovnoj cijevi *c*. Ova

je sastavljena s mesinganim štapićem *s*, na koji je zatavljen drugi kraj mesinganog pera. Doticaljka je za-

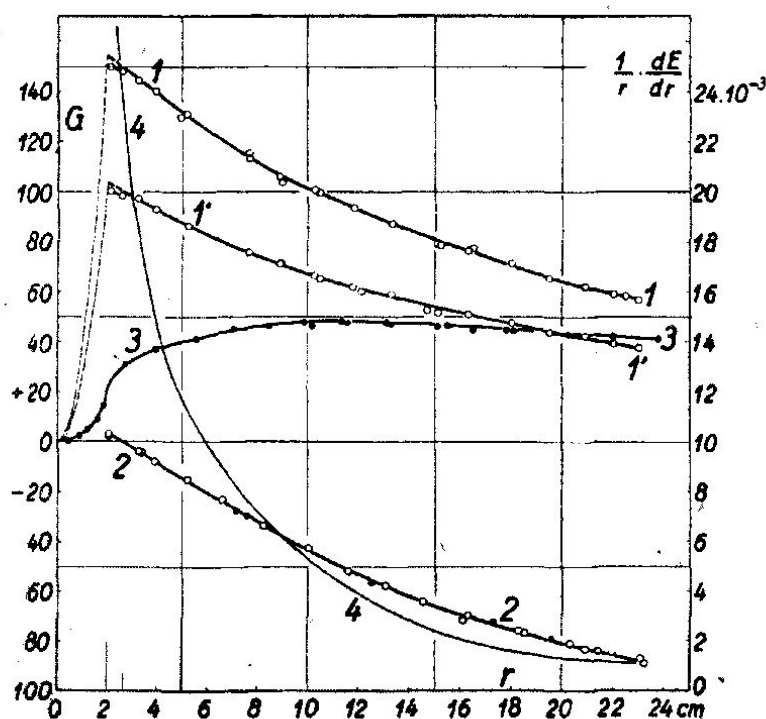


Sl. 5. Shema posebne doticaljke.

šiljena, pa svršava kontaktnom plohom  $1,5 \times 0,3 \text{ mm}^2$ . Namješta se paralelno s osi magneta tako, da joj je dulja strana kontakta okomita na polumjer ploče. Na taj način oštro je određena daljina *r*, kojoj pripada izmjereni otklon galvanometra kao mjera za induciranu elektromotornu silu. Da se doticaljka s perom ne bi okretala, kad ploča rotira, na cijevi je urezan glatki kanal *k*, u koji ulazi iz doticaljke jedan štapić. Doticaljka se izolira od stalka celuloidom ili kaučukom omotanim oko cijevi *c*, gdje ju hvata stezaljka. Trajektorija na rotirajućoj ploči praktično je krug i za dijelove ploče bliže rubu ( $r > 16 \text{ cm}$ ), gdje njezina izbačenost najjače dolazi do izražaja; okolnost pak, da u ovim dijelovima ploče kontakt ne leži uvijek točno u ekvatoru, jedva da nešto upliva na opaženi otklon galvanometra. S druge strane glavna posljedica izbačenosti je u tome, što se zbog promjena pritiska na mjestu dodira znatno mijenja električni otpor, pa to prouzrokuje veća kolebanja otklona na galvanometru s malenim otporom. Kako je već spomenuto, dao se je uvijek naći primjereni pritisak doticaljke na ploču, da je i za rub



ploče amplituda kolebanja otklona ostajala ispod  $\pm 2\%$ . Međutim, ako je doticaljka nekoliko minuta radila na istom mjestu ploče, plitki žlijeb, koji ona tu stvara, ohrapavi, kako se to opaža pod lupom. Takvo se stanje očituje kriještavim tonom, koji izdaje ploča, i velikim nemirom galvanometra. Ploča se na takvom mjestu ne da više upotrebiti, pa kod ponavljanja mjerenja moramo doticaljku premjestiti za 1 do 2 mm bliže ili dalje. Upliv kolebanja štapa, koji nosi držak, u koji se upire lijeva osovina magneta, o čemu je već prije bilo govora, iznosio je na ekvatoru magneta oko 1 mm,



Sl. 6. Raspodjela inducirane elektromotorne sile na ploči u ravnini ekvatora magneta (1, 1', 2) i u čonoj ravnini magneta (3). Krivulje 1 i 1' = doticaljke su na osovini magneta i na ploči; 2 = jedna doticaljka na ogrlici ploče (nepomična), druga na ploči; 3 = doticaljke su na osovini i na ploči. — Krivulja 4 = raspodjela gustoće vanjskog magnetskog toka u ravnini ekvatora.

pa s tolikim ekscentricitetom trajektorija treba računati kod nizova mjerenja u ravnini ekvatora. — Os magneta je u opće u mjerenjima, pa tako i u ovima, ležala okomito na ravnini zemaljskog meridijana. Prema tome je ploča rotirala u toj ravnini. Tim je u njoj eliminirana indukcija zemaljskim magnetnim poljem.<sup>323</sup>

Najprije su izvedena mjerenja na ploči u ekvatorijalnom položaju na magnetu. Prva skupina obuhvatila je mjerenja napetosti između osi magneta i ploče u zavisnosti o polumjeru ( $r$ ). Jedna

<sup>323</sup> Faraday's Diary, § 108—109, § 272; Exp. Res., Ser. II, § 153.

obična mesingana doticaljka dodiravala je mesinganu osovinu magneta, dok se jedna od opisanih posebnih doticaljki dala pomicati uzduž horizontalnog polumjera ploče. Na ploči je bila izmjerena i crnilom označena ljestvica daljina od osi u cm, pa su se nakon pokusa daljine  $r$  dale odrediti točno na mm po oštrom tragu, koji je ostavila doticaljka. — Nizovi opažanja izvedenih u ovom spoju prikazani su u sl. 6 krivuljama  $I$  (0,5 okreta/sec.) i  $I'$  ( $\frac{1}{3}$  okreta/sec.).<sup>324</sup> Za  $r < 3$  cm pomična doticaljka je premještena na glavu ogrlice, t. j. na daljinu 12,7 mm od ravnine ekvatora. Zato su tu otkloni manji. Zbog toga su krivulje za  $2 \text{ cm} < r < 3 \text{ cm}$  ekstrapolirane. — Crticama označene parabole za  $r < 2$  cm prikazuju u prvoj približnosti raspodjelu elektromotorne sile u ekvatorijalnom polumjeru magneta.

U drugoj skupini mjerene su napetosti na ploči prema jednoj točki na njoj. Drugi spoj galvanometra premješten je sa doticaljke na osovinu magneta na novu specijalnu doticaljku, koja je dodiravala pobočje ogrlice ploče, t. j.  $r_0 = 26,5$  mm. Druga doticaljka pomicala je uzduž horizontalnog polumjera ploče (vidi sl. 4). Dakle je izmjerena raspodjela elektromotorne sile na samoj ekvatorijalnoj ploči. Krivulja 2 u sl. 6 prikazuje rezultat za frekvenciju vrtnje 0,5 okreta/sec.; samo točke, koje odgovaraju daljinama  $r < 3,5$  cm, gdje su otkloni maleni, snimljene su uz frekvenciju 1,0 okreta/sec., pa su otkloni prepolovljeni. Točke na ovoj krivulji, koje su prikazane praznim kružićima, pripadaju nizu mjerenja, u komu je ploča bila vodljivo pričvršćena uz magnet, dok točke prikazane punim kružićima odgovaraju nizu kontrolnih mjerenja, gdje je ploča bila izolirana od magneta.

Zatim je ploča premještena na čelo magneta, pa je uz prije navedene promjene i mjere opreznosti snimljena raspodjela elektromotorne sile u čenoj ravnini prema osovinu magneta, osim za  $r < 2$  cm, gdje je ta raspodjela snimljena 3 mm ispred čene ravnine (frekvencija vrtnje 0,5 okreta/sec.). Eliptičnost trajektorija uslijed savijanja štapa glavnog stalka, koji nosi lijevu osovinu magneta izbjegnuta je tim, što je i horizontalni štap s pomičnom doticaljkom montiran izolirano na tom istom štapu. Ovaj niz mjerenja

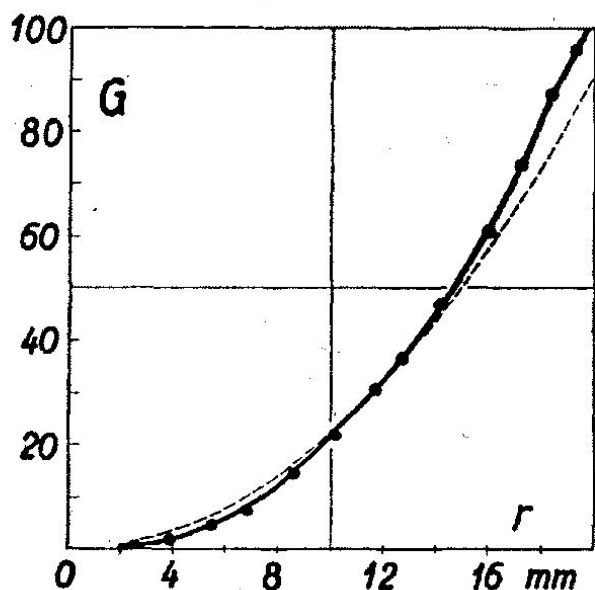
<sup>324</sup> U ovoj slici dugi potez na apscisi  $r = 2$  cm odgovara polumjeru magneta, a nešto kraći potez na apscisi  $r = 2,65$  cm odgovara polumjeru pobočja ogrlice. Desna ordinatna podjela vrijedi za krivulju 4. — U svima slikama, koje prikazuju rezultate mjerenja,  $G$  znači otklone galvanometra u mm.



prikazan je krivuljom 3 u sl. 6. Opći tok ove krivulje odgovara starijim mjerenjima Felicievim, jer se predznak porasta elektromotorne sile kod  $r \doteq 12$  cm preokreće.

Konačno je iz krivulje 2 određena grafički njezina diferencijalna krivulja  $\frac{dE}{dr}$ , pa je krivuljom 4 prikazano  $\frac{1}{r} \cdot \frac{dE}{dr}$  prema jednadžbi (8) iz prethodnog poglavlja (vrijedi desna ordinatna podjela).

Unutrašnji dio krivulje 3 u ovoj slici odgovara čelu magneta, gdje se magnetski tok približuje homogenosti, pa je taj dio očito sličan paraboli. Da se to ispita, ovaj je dio krivulje snimljen uz veću frekvenciju vrtnje i uz mikrometričko mjerenje daljina  $r$ . Opažanja sa zapornom urom dala su za frekvenciju  $f = 2,893$



Sl. 7. Raspodjela inducirane elektromotorne sile na polumjeru magneta 3 mm ispred čeonu ravnine

okreta/sec. Da bi se omogućilo točno mjerenje daljina  $r$  na mesinganoj pločici na čelu magneta, povučen je na njoj crvenom tintom jedan promjer, pa je doticaljka kod vrtnje na njemu urezala oštro omeđene tragove. Promjeri ovih tragova su poslije opažanja mikrometarski izmjereni pomoću mikroskopa s malenim povećanjem. Tako dobivena raspodjela elektromotorne sile prikazana je potpuno izvučenom krivuljom u sl. 7. Crtkana krivulja je parabola,

koja odgovara točki eksperimentalne krivulje za  $r = 12$  mm.

Spomenuta Grottrianova izračunavanja dala su za čeonu ravninu željeznog cilindra u homogenom magnetnom polju rastući porast magnetičke sile  $\mathfrak{H} = \frac{\mathfrak{B}}{\mu}$  s udaljenošću od osi, tako da je  $\mathfrak{H}$  na vanjskom rubu okruglo 4,4 puta veće nego u osi.<sup>325</sup> Međutim kod unipolarne indukcije na čelu magneta dolazi u obzir  $\mathfrak{B}$  okomito na ravninu gibanja, pa iz jednoga i drugoga rezultira raspodjela

<sup>325</sup> O. Grottrian, Ann. d. Phys. (4) 34, 1, 1911, S. 54, Tab. XIV.

elektromotorne sile u približno paraboličnoj krivulji. Veća strmina eksperimentalne krivulje prema crtkanoj paraboli dolazi dijelom i odatle, što je gustoća magnetskog toka oko osi umanjena i zbog mesingane osovine, pa je pod uplivom toga i krivulja snižena do  $r \sim 8$  mm.

#### 4. Elektromotorne sile inducirane u magnetu i u vanjskom vodiču.

Pravilo o smjeru struje dobivene unipolarnom indukcijom možemo iskazati ovako:

Ako gledamo u sjeverni pol magneta, pa se *magnet* vrti smjerom kazala na uri, inducirana struja teče u vanjskoj žici od pola prema ekvatoru magneta.<sup>326</sup>

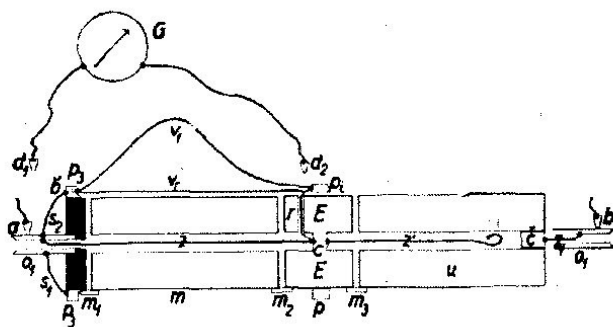
U teoretskim izvođenjima uzima se kao gotova i nesumnjiva činjenica, da je integralna elektromotorna sila inducirana na površini magneta od ekvatora do osi jednaka integralnoj elektromotornoj sili induciranoj u ekvatorijalnom ili ma kojem drugom presjeku između ekvatora i osi. Takav zaključak izlazi iz ekstrapolacije osnovnog Faradayeva pokusa, navedenog u 2. poglavlju pod a), iz kojega je Faraday izveo i spomenuti put, kojim on izjednačuje vanjski i unutrašnji tok. Direktni dokaz za to nije izvođen, jer se stvar čini posve evidentnom.

Sastav složenog magneta omogućuje, da se ovo pitanje, kao i neka druga pitanja o elektromotornoj sili, izravno preispitaju, da bi se vidjelo, do koje se točnosti može ovaj zaključak potvrditi mjerenjima.

Slika 8 shematski prikazuje *lijevu* stranu složeno-

nog magneta u izoliranom stanju sa spojevima, koji se na njemu dadu izvesti, i to tako, da ono, što je na slici na desno od neutralne zone također prikazuje neke spojeve na *lijevoj* strani magneta. Isto tako donja polovina prikazuje opet druge spojeve nego gornja. U ekvatoru  $p$

<sup>326</sup> T. j. i od sjevernog pola prema ekvatoru i od južnog pola prema ekvatoru.



Sl. 8. Shema spojeva na složenom magnetu u izoliranom sastavu.



znači prsten, koji leži neposredno na magnetu, dok je  $p_i$  izolirani prsten.

I. Najprije je istražena jednakost cijele elektromotorne sile u različitim putevima, kojima se obuhvaća u vrtnji cijeli magnetski tok. To su ovi spojevi:

Spoj *a*:  $Gd_2pEcza d_1G$ , bez  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $m_1$ ,  $m_2$ , tako da struja kroz magnet teče aksijalnom žicom  $z$ , vijkom  $c$ , ekvatorom  $E$  na neizolirani prsten  $p$  (lijeva donja četvrtina slike uz isključenje površine). Prema tome dolazi u obzir samo indukcija u ekvatoru  $E$  magneta («ekvatorijalni spoj»).

Spoj *b*:  $Gd_2p_rzad_1G$ , bez  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $m_1$ ,  $m_2$ , te bez  $v_1$  i  $v_r$ , tako da struja kroz magnet teče aksijalnom žicom  $z$ , pa radijalnom žicom  $r$  na izolirani prsten  $p_i$  (lijeva gornja polovina slike). Prema tome dolazi u obzir samo indukcija u radijalnoj žici  $r$  («spoj radijalne žice»).

Spoj *c*:  $Gd_2pm_2mm_1p_1s_1ad_1G$ ; aksijalna žica uvučena je izolirano u šupljinu magneta, pa struja teče površinom plašta magneta i žicom  $s_1$ ; bez  $r$ ,  $v_r$ ,  $v_1$ . Prema tome dolazi u obzir samo indukcija u plaštu magneta i u žici  $s_1$  («površinski spoj»; donji rub lijeve donje četvrtine slike).

Spoj *d*:  $Gd_2p_1v_1p_2s_2ad_1G$ ; aksijalna i radijalna žica su izolirane kao u spoju *c*; bez  $v_r$ ,  $m_1$ ,  $m_2$  (lijeva gornja četvrtina slike). Dakle struja teče rotirajućim vanjskim vodičem  $v_1p_2s_2$ , koji je od magneta izoliran; t. j. dolazi u obzir samo indukcija u tom vanjskom vodiču.

Spoj *e*:  $Gd_2pm_2ucz_1bd_1G$ , gdje je  $m_2 \equiv m_1$  kao i  $b \equiv a$  (desna donja četvrtina slike). Struja ide kroz magnet površinom od  $p$  do  $m_2$  i unutrašnjošću  $u$  do mesinganog čepa  $\check{c}$ , t. j. dolazi u obzir samo indukcija u ovim dijelovima («unutrašnji spoj»).

U svim ovim spojevima bio je i desni dio magneta u izoliranom stanju, osim u spojevima *c* i *e*, gdje je i na desnoj strani izolacija kod *i* (sl. 2) bila premoštena na površini magneta tankim limom.

Spoj *f*: magnet je doveden u opisano posve vodljivo stanje.

Da bi se omogućila redukcija otklona na površinu ekvatora, mesingani prsten  $p$  namješten je na svom propisanom mjestu u ekvatoru, pa je iz većeg broja opažanja određen, kao i inače, srednji otklon galvanometra uz frekvenciju vrtnje 1 okret/sec., dok je doticaljka dodiravala sredinu prstenova plašta. Onda je prsten po-

maknut toliko, da je jedna njegova strana došla u ravninu ekvatora, pa je pri istoj frekvenciji vrtnje određen srednji otklon, dok je uska klinasta doticaljka dodirivala stranu prstena u daljini 0,3 do 0,4 mm od površine magneta.<sup>327</sup> Tim je određena korektura za elektromotornu silu između sredine plašta prstena i ekvatora magneta.<sup>328</sup> Za frekvenciju vrtnje 1 okret/sec. ta je korektura iznosila 2,5 dijelova ljestvice, pa se taj iznos nadodaje opažanim srednjim otklonima u nizovima mjerenja.

Prije svakog niza mjerenja magnet je nanovo magnetiziran. Otkloni galvanometra svedeni su na magnetski tok  $2,063 \cdot 10^4$  maksvela, koliko je on iznosio u prvom mjerenju. — Sva su mjerenja izvedena pomoću aperiodičkog galvanometra s predsklopnim otporom 300 B. A. U.

Da bi se rezultati dali bolje kontrolirati, u svakom su spoju izvedena mjerenja sa frekvencijama vrtnje  $\frac{1}{3}$ ,  $\frac{2}{5}$ , 0,5,  $\frac{2}{3}$  i 1,0 okreta/sec. Razlikama između pojedinih nizova, osim kolebanja termostruja na skliznim kontaktima, doprinose pogreške u mjerenju magnetskog toka.

Tablica 1.

|                                 | Frekvencija vrtnje, okreti/sec. |               |      |               |       |
|---------------------------------|---------------------------------|---------------|------|---------------|-------|
|                                 | $\frac{1}{3}$                   | $\frac{2}{5}$ | 0,5  | $\frac{2}{3}$ | 1,0   |
| Izračunano                      | 53,3                            | 64,0          | 80,0 | 106,6         | 159,9 |
| Spoj a                          | 53,8                            | 64,1          | 79,6 | 105,8         | 158,1 |
| „ b                             | 53,2                            | 63,6          | 79,4 | 105,6         | 157,6 |
| „ c                             | 53,7                            | 63,7          | 79,5 | 105,8         | 157,1 |
| „ d                             | 53,6                            | 63,9          | 79,5 | 105,7         | 157,7 |
| „ e                             | 53,8                            | 63,8          | 79,7 | 105,9         | 157,9 |
| „ f                             | 53,9                            | 64,5          | 80,0 | 106,7         | 158,2 |
| „ b <sub>1</sub> <sup>329</sup> | 54,0                            | 63,9          | 79,8 | 106,8         | 158,5 |

<sup>327</sup> Površina magneta uz prsten bila je oblijepljena prugom celuloida debljine 0,2 mm, bez preklapanja.

<sup>328</sup> Zanimarena je elektromotorna sila, koja nastaje u prstenu debljine cca. 0,35 mm.

<sup>329</sup> U spoju b<sub>1</sub> (varijanta spoja radijalne žice) magnet je bio u posve vodljivom stanju, ali je u ekvatoru imao izolirani prsten p<sub>i</sub>, koji je bio spojen s radijalnom žicom.



Rezultati mjerenja svedeni na isti magnetski tok  $2,063 \cdot 10^4$  maksvela i na površinu ekvatora prikazani su u tablici 1.

Dakle su integralne elektromotorne sile inducirane u ovim spojevima zaista jednake.

U teorijama Szarvassia i Jaumanna glavna važnost pripada područjima površine magneta podalje od ekvatora. Po Szarvassiu i po Abrahamu cijela je površina sklizna ploha, ali u područjima podalje od ekvatora najveća je gustoća komponente magnetske indukcije okomite na skliznu plohu, pa je tu najveća gustoća plošnih električnih vrtloga. Po Jaumannu pak odlučna uloga u pogledu plošnih vrtloga pripada samim čeonim ploham magneta. Međutim u spojevima *a* i *b* ta su područja najvećih gustoća plošnih vrtloga izolirana od ekvatorijalnog područja magneta. Na glavama srednjeg umetka *B* (sl. 2) nema plošnih vrtloga, jer su na objema stranama slojevi izolatora i čvrsto zalijepljeni uz glave srednjeg umetka i uz susjedne glave šupljih magneta *A* i *C* i rotiraju s njima istom kutnom brzinom, pa tu nema ni skliznih ploha ni torzije medija. Ispoređivanjem rezultata iz tablice 1 za spojeve *a* i *b* s jedne strane s rezultatima za površinski spoj *c*, s druge strane s rezultatima za spoj *f*, gdje je magnet u posve vodljivom stanju, trebalo bi dakle s gledišta ovih teorija zaključiti, da je posve svejedno, da li je područje plošnih električnih vrtloga vodljivo spojeno s krugom struje ili je od njega posve izolirano.

S druge strane jednakost elektromotorne sile u spojevima *a* i *b*, gdje su najvažniji dijelovi površine magneta izolirani od kruga struje, s elektromotornom silom dobivenom u spoju *f* ne govori u prilog Mieovom tumačenju, prema kojem bi odvijanju cilindričke površine magneta trebala pripadati odlučna ili bar istaknuta uloga kao faktoru, kojim se povećava magnetski tok u krugu, pogotovo ako se kao radijalni dio njegove plohe ima uzeti čeonu ploha ili presjek u visini »polova«.

II. Ispoređene su elektromotorne sile na pobočju magneta s elektromotornim silama na različitim putevima oko pobočja. Mjerenja su izvedena uz frekvenciju vrtnje  $\frac{2}{3}$  okreta/sec. Kod svih ovih nizova mjerenja bila je aksijalna žica izolirana. Doticaljka je dodirivala prsten *p*<sub>3</sub> na ebonitnoj glavi uz sam ebonit na njegovoj lijevoj strani. Ekvatorijalni prsten *p* dodirivala je doticaljka u da-

ljini 0,3 do 0,4 mm od površine magneta, a izolirani prsten  $p_1$  u daljini 1,4 mm od površine magneta. Za oba ekvatorijalna dodira svedena su opažanja na površinu magneta u ekvatoru, dok je dodir  $b'$  na lijevom rubu prstena  $p_3$  naprosto uzet kao »površina magneta«.

Spoj  $g$ :  $Gd_2pm_2mm_1p_3b'd_1G$ , t. j. dolazi u obzir indukcija na pobočju magneta.

Spoj  $h$ :  $Gd_2p_1v'_1p_3b'd_1G$ . Žica  $v'_1$  znači ravnu žicu nategnutu između  $p_1$  i  $p_3$ . Obručevi  $m_1$  i  $m_2$  su uklonjeni; prema tome je žica  $v'_1$  posve izolirana od magneta, pa dolazi u obzir samo indukcija u toj žici.

Spoj  $j$ : isto kao spoj  $h$ ; samo je mjesto ravne žice  $v'_1$  došla izbočena žica  $v_1$ .<sup>329a</sup>

Spoj  $k$ . Na radijalnu žicu nastavljena je žica  $v_r$ , koja je spojena s prstenom  $p_3$  na ebonitnoj glavi. U ekvatoru je naniješten normalni prsten  $p$ , pa je izveden slijedeći spoj:  $Gd_2pEcrv_r p_3b'd_1G$ . Ovaj se spoj može smatrati varijantom spoja  $j$ , u koliko je žica  $v_1$  sada savijena u unutrašnjost magneta lukom  $pEcr$ . --

Rezultati mjerenja, svedeni na površinu ekvatora i na magnetski tok  $2,063 \cdot 10^4$  maksvela prikazani su u tablici 2.

Tablica 2.

Frekvencija vrtnje:  $\frac{2}{3}$  okreta/sec.

| Spoj | Otklon |
|------|--------|
| $g$  | 95,7   |
|      | 95,5   |
| $h$  | 96,5   |
| $j$  | 96,0   |
| $k$  | 96,5   |
|      | 95,4   |

III. U nekim spojevima iz II. skupine izmjerena je elektromotorna sila između osovine  $o_1$  i unutrašnjeg ruba prstena  $p_3$  na

<sup>329a</sup> Varijantama spojeva  $h$  i  $j$ , dotično i spoja  $d$ , treba smatrati spojeve u sl. 10/B i 10/C kod Hağenbacha (l. c. <sup>104a</sup>, str. 252), kao i spojeve za unipolarnu rotaciju u njegovim slikama 9/II i 9/III (str. 251). S velikom točnošću dobivenu jednakost induciranih elektromotornih sila, dotično okretnih momenata, s onima u ekvatorijalnom, odnosno unutrašnjem, spoju on je tumačio s gledišta, koje je on zastupao. — Slika 10/B sadrži jednu nehotičnu pogrešku u crtnji vanjskog kruga.



ebonitnoj glavi, pa je svedena na isti dodir kao u II. skupini.

Spoj  $l$ : u sastavu spoja  $g$  doticaljke  $d_1$  i  $d_2$  su u položajima  $a$  i  $b'$ .

Spoj  $n$ : u sastavu spoja  $k$  doticaljke  $d_1$  i  $d_2$  su u položajima  $a$  i  $b'$ .

Rezultati mjerenja, svedeni na magnetski tok  $2,063 \cdot 10^4$  maksvela, nalaze se u tablici 3.

Tablica 3.

Frekvencija vrtnje:  $\frac{2}{3}$  okreta/sec.

| Spoj | Otklon |
|------|--------|
| $l$  | 9,9    |
| $n$  | 9,6    |

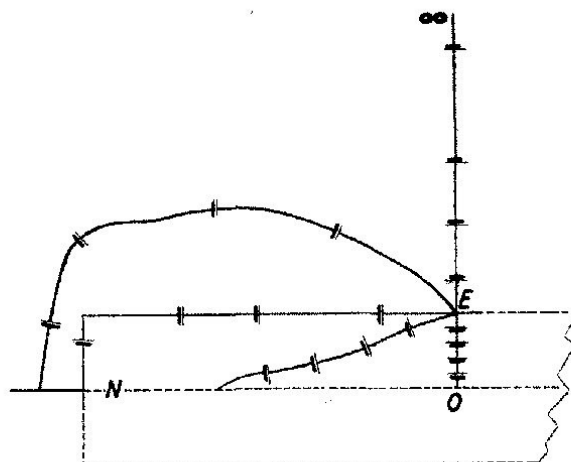
Zbroj srednjih vrijednosti iz tablica 2. i 3. daje 105,7 dijelova, dok srednja vrijednost otklona iz tablice 1. za istu frekvenciju vrtnje daje 106,0 dijelova. —

Galvanometar spojen paralelno s dijelom, koji rotira, daje kod istog smjera vrtnje otklon na istu stranu bilo da se struja uzima iz samog magneta ili iz vanjskog vodiča, koji je izoliran od magneta (spojevi  $d$ ,  $b$ ,  $j$ ). Dakle, ako magnet i vanjski vodič rotiraju istim smjerom, u njima se induciraju elektromotorne sile *istog* predznaka. To je jasno već iz Faradayevih i Plückerovih nazora o unipolarnoj indukciji zbog rotacije zemlje. Ma koja krivulja povučena od ekvatora magneta do njegove osi, pa tako i površina magneta, kao i ma koji vanjski vodič, koji rotira zajedno s magnetom, ekvivalentna su sjedišta jednakih elektromotornih sila, koje su međusobno u paralelnom spoju. Tome odgovara shematski prikaz u sl. 9.

Kod Faradaya je galvanometar uklopljen između vanjske žice i osi magneta, pa s toga gledišta treba promatrati njegov iskaz, da u vanjskoj žici i u magnetu nastaju jednake i *suprotne* težnje k stvaranju struje, ako ta žica i magnet zajedno rotiraju istim smjerom. Faraday se dakle izražava s gledišta položaja galvanometra u njegovom eksperimentalnom uređaju. Tako je i u prethodnom poglavlju ove radnje galvanometar bio uklopljen između vanjske žice, koju predstavlja mesingana ploča, i magneta; dakle

za njega struje iz magneta i iz ploče imaju suprotan smisao, pa je krivulja 2 u slici 6. povučena na negativnoj strani. Na isto dakako izlazi, ako smjer elektromotorne sile definiramo prema smjeru *struje* u bilo kojem drugom dijelu kruga, n. pr. prema njezinom smjeru u magnetu.

Potrebno je ovo napomenuti, jer se često, pa i kod istaknutih pisaca, nalaze prikazi o smjeru elektromotorne sile inducirane vrtnjom vanjske žice, koji ne odgovaraju eksperimentalnom nalazu prema sl. 9. Tako već M a x w e l l kod unipolarne indukcije na modelu zemlje tvrdi, da nastaje ista elektromotorna sila bilo da se zemlja vrti od zapada prema istoku ili da se vanjska žica (the quadrant) vrti od istoka prema zapadu.<sup>330</sup> — Dvojbenim bi moglo izgledati na prvi mah slijedeće mjesto kod A b r a h a m a, koje se jednako nalazi u različitim izdanjima prvog sveska njegove teorije elektriciteta.<sup>331</sup> »Inducirana integralna elektromotorna sila ne bi se promijenila, kad bismo, mjesto da vrtimo magnet, njega držali na miru, a mjesto njega bismo vrtjeli žicu i zrak u suprotnom smislu«. Pošto se ovdje žica i zrak vrte istodobno, još se



Sl. 9. Shema smjera induciranih elektromotornih sila u magnetu i u vanjskom vodiču kod vrtnje istim smjerom

radi o skliznoj plohi i plošnim vrtlozima vektora  $\mathcal{E}$  na površini *magneta* s nepromijenjenim predznakom. Ali A b r a h a m, nakon objašnjenja, da gibanje zraka ne odgovara činjenicama, nastavlja ovako:<sup>331</sup> »Međutim ne mijenja se rezultat, ako pustimo da zrak miruje, a da se

<sup>330</sup> J. C l. M a x w e l l, Treat. on Electr. a. Magnetism, vol. II, 3. izd. (Oxford 1904), § 533: »The electromotive force will be the same whether we suppose the earth at rest and the quadrant moved from east to west, or whether we suppose the quadrant at rest and the earth turned from west to east«. — Iz onoga, što slijedi, i iz njegove slike 31. vidi se, da M a x w e l l smjer elektromotorne sile definira prema smjeru struje u vanjskom krugu.

<sup>331</sup> M. A b r a h a m u. A. F ö p p l, Theorie d. Elektr., Bd. I, 4. izd. (1912), S. 397; M. A b r a h a m, ibid., 7. izd. (1923.), S. 377: »Die induzierte Integralkraft würde sich nicht ändern, wenn man statt den Magneten sich drehen zu lassen, ihn festhielte, und statt dessen Draht und Luft *im entgegengesetzten Sinne* umlaufen liesse«... »Indessen ändert sich das Ergebnis nicht, wenn man *die Luft ruhen* und nur den Draht ring rotieren lässt. Dann besteht an dessen Oberfläche eine Gleitfläche...«. — Kurziv sam ja potcrtao.



samo krug žice vrti. Jasnije je, da se žica i sada vrti nepromijenjeno u suprotnom smislu. Međutim kod toga je promjena u tome, što je sada po Abrahamu površina žice sklizna ploha s plošnim vrtlozima istim kao prije, kad im je sjedište bilo na površini mirujućeg magneta. Prema tome bi kod vrtnje žice istim smjerom, kojim se prvobitno vrtio magnet, predznak plošnih vrtloga na njoj trebao biti suprotan onome, koji imaju plošni vrtlozi na površini magneta, kad se on vrti prvobitnim smjerom. Tim pak dolazimo do istog predznaka elektromotorne sile u vanjskoj žici kao kod Maxwella. Abrahamova ograda, da rješenje po II. Hertzovoj jednadžbi ne daje podataka o sjedištu elektromotorne sile, ne mijenja u tome ništa.<sup>332</sup>

Moglo bi se činiti, da je Abraham ovdje stajao pod uplivom svog iskaza o smjeru inducirane struje, koji nalazimo u početku poglavlja o unipolarnoj indukciji.<sup>333</sup> Taj njegov iskaz doduše odgovara spomenutom Faradayevu neposrednom eksperimentalnom nalazu, kad je galvanometar ležao između vanjske žice i magneta. Međutim Abraham je ovo mjesto<sup>333</sup> skoro doslovno preuzeo iz spomenutog Föpplova poglavlja o unipolarnoj indukciji,<sup>334</sup> gdje pisac stoji na hipotezi o rotaciji silnica, pa mu je uz pretpostavku te hipoteze tumačenje posve drukčije; dok Abraham je počevši od 2. izdanja pitanje rotacije ili mirovanja silnica posve zabacio.<sup>335</sup>

<sup>332</sup> Abraham i Föppl u 2. izdanju istog djela (1904.), gdje još nema primjene skliznih ploha, govore na str. 407. izravno o negativnoj brzini vanjske žice.

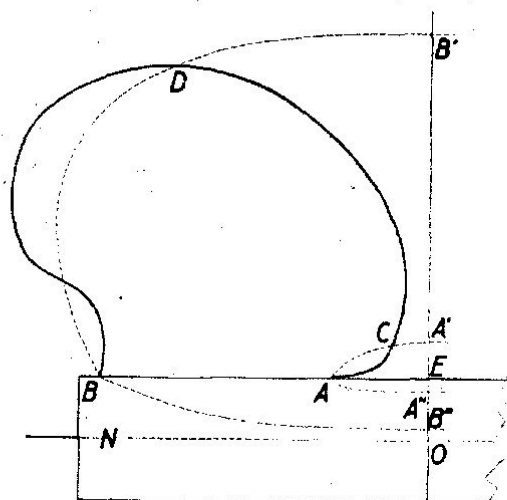
<sup>333</sup> Abraham u. Föppl, l. c.<sup>331</sup>, S. 395; Abraham, l. c. ibidem, S. 375—376: »Es ist für das Zustandekommen des Stromes gleichgültig, ob die Drahtschlinge ruht und der Magnet sich dreht, oder ob der Magnet ruht und die Drahtschlinge sich in der entgegengesetzten Richtung dreht«.

<sup>334</sup> Föppl, l. c.<sup>200</sup>.

<sup>335</sup> U drugom izdanju spomenuti je iskaz obrazložen principom relativnosti gibanja kod indukcije. Istom bi principu trebalo pripisati i ovu tvrdnju, koja u kasnijim izdanjima dolazi neposredno ispred tog iskaza o smjeru inducirane struje: »Die induzierte Kraft macht sich natürlich nur dann bemerkbar, wenn die Drahtschlinge relativ zum Magneten rotiert« (u drugom izdanju: »wenn die Drahtschlinge nicht mit dem Magneten rotiert«). Kad se eksperimentalno gleda na stvar, ova tvrdnja stoji izravno u opreci s pozitivnim rezultatima za spojeve  $d$ ,  $h$ ,  $j$  ovog poglavlja, a pogotovo s rezultatima spomenute aparature  $E$  — 218 kod Suttona (l. c.<sup>98b</sup>), gdje je elektromotorna sila nezavisna o tome, da li magnet miruje, ili rotira istim ili rotira suprotnim smjerom nego žica. Međutim je i ovo mjesto, počevši od drugog izdanja, više-manje preuzeto od Föppla (l. c., S. 328), a razumljivo je samo s gledišta Prestonove hipoteze o rotaciji silnica, jer samo u njoj ovakva primjena relativnosti dolazi do izražaja.

Nema sumnje, da je ovakvim formulacijama moglo doprinijeti i to, da se uzimalo u obzir preokrenuti smjer vanjskog magnetskog toka prema njegovom smjeru u unutrašnjosti magneta. Međutim se i bez obzira na to ovakva definicija smjera elektromotorne sile u vanjskoj žici teško da dovesti u sklad s pravim stanjem; ona je nezgodna i zato, jer dovodi do nesuvislosti u pogledu smjera inducirane elektromotorne sile na prelazu od površine magneta na vanjski medij. Zamislimo najme vanjsku žicu, koja leži tik uz površinu magneta, ne dodirujući je. Onda bi se kod vrtnje istim smjerom trebala inducirati na površini magneta elektromotorna sila jednog, a u susjednoj vanjskoj žici elektromotorna sila suprotnog smjera.

U vanjskoj žici  $ACDB$  (sl. 10) otpadaju za integralnu induciranu elektromotornu silu svi dijelovi, koji režu silnice dva puta. Povucimo silnice, koje izlaze iz točaka  $A$  i  $B$ , gdje žica dodiruje površinu magneta. Onda je očito, da je mjerodavna indukcija u toj vanjskoj žici, kad ona rotira, izazvana samo magnetskim tokom, koji reže luk  $CD$ , pa je inducirana elektromotorna sila jednaka elektromotornoj sili, koja bi kod iste kutne



Sl. 10. Projekcija vanjskog vodiča  $ACDB$  u ravninu ekvatora.

brzine bila inducirana u ekvatorijalnoj ploči između  $A'$  i  $B'$ . Na taj način možemo svaki vanjski luk žice projicirati u ekvatorijalnu ravninu putem silnica, koje izlaze iz njegovih dodirnih točaka na magnetu. Onda su inducirane elektromotorne sile  $V_{B'A''} = V_{BA} = V_{DC} = V_{B'A'}$ , gdje su  $V_{BA}$  i  $V_{B'A''}$  elektromotorne sile inducirane kod vrtnje magneta istim smjerom i istom kutnom brzinom. Premjestimo li  $A$  u sam ekvator  $E$ , vidimo, da je ekvator stjecište istoimenih elektromotornih sila u magnetu i u vanjskim žicama kod danog smjera vrtnje. U krugu vanjske žice, koja rotira zajedno sa magnetom, a od koje bi jedan dio išao po silnici  $BDB'$ , a drugi po ekvatorijalnoj ravnini  $B'E$ , povećavanje (ili rezanje) magnetskog toka zbiva se samo u ekvatorijalnoj ravnini, isto kao što bi to bilo u unutrašnjem krugu



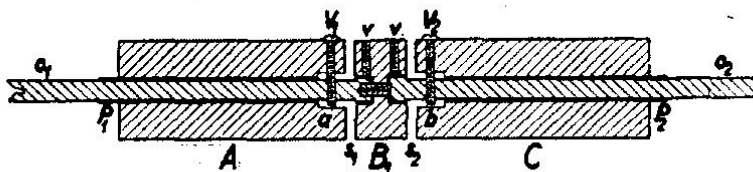
$BB''EB$  (zanemarujući u oba slučaja  $BE$ ), pa u oba slučaja integracija u integralu

$$\int r [\mathfrak{B} dr]$$

daje isti predznak okrenut prema  $E$  upravo zato, što  $\mathfrak{B}$  u vanjskom krugu ima protivni predznak.

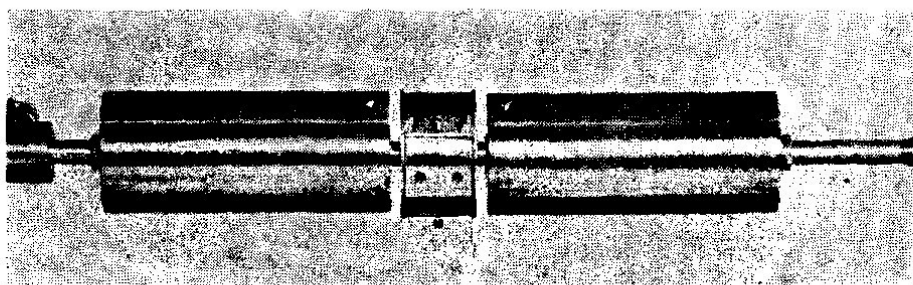
### 5. Raspodjela elektromotorne sile u procijepu magneta paralelnom sa ravninom ekvatora.

Šuplji magneti složenog magneta upotrebljeni su, da bi se sastavio složeni magnet s procijepima, kako je prikazan shematski u slici 11. i snimkom u slici 12. Izrađena je dvodijelna mesingana osovina  $o_1 + o_2$  debljine 8 mm, duljine 30 cm. Dio  $o_2$  svršava na



Sl. 11. Shema složenog magneta s procijepima  $s_1$  i  $s_2$ .

svom lijevom kraju vijkom, koji ulazi u maticu provrtanu na desnom kraju dijela  $o_1$ . Od kobaltnog čelika MK5 izrađen je jedan kraći srednji umetak  $B_1$ , duljine 2,0 cm, promjera 40 mm, koji je bio zakaljen zajedno s drugim komadima. Osnovne plohe ovog



Sl. 12. Snimka složenog magneta s procijepima.

umetka polirane su do zrcalnog sjaja. Kroz središte umetka provrtana je matica, u koju pristaje spomenuti vijak iz dijela osi  $o_2$ . Srednji umetak je navijen na taj vijak, na ovaj je s druge strane do kraja navijen drugi dio osovine  $o_1$ , pa je onda srednji umetak radijalnim vijcima  $v$  od mesinga čvrsto pritegnut uz odebljane krajeve dijelova osovine  $o_1$  i  $o_2$ .

Zatim su s jedne i s druge strane pričvršćeni uz osovinu šuplji magneti  $A$  i  $C$  iz slike 2. tako, da je sa svake strane srednjeg umetka ostao cilindrički procijep širine 4 mm ( $s_1$  i  $s_2$ ). Pričvršćivanju šupljih magneta služe šuplji mesingani prstenovi  $P_1$  i  $P_2$  i mesingani vijci  $V_1$  i  $V_2$ , koji prolaze kroz osovinu. Prstenovi  $P_1$  i  $P_2$  su malo konički, a uzdužno su do polovine prepiljeni, da bi imali potrebnu elastičnost. Da bi se omogućilo, da se šuplji magneti po mogućnosti centrično pričvrste uz osovinu i na svojim unutrašnjim stranama, okrenutim prema srednjem umetku  $B_1$ , izrađena su dva točno polucilindrička umetka od mesinga, koji s nešto malo slobode ispunjaju cilindričko proširenje kod  $a$ , dotično na drugoj strani kod  $b$ , između osovine i magneta sve do vijka  $V_1$  (dotično na drugoj strani do  $V_2$ ). Najprije se šuplji magnet  $A$  na vanjskoj strani djelomično pričvrsti uz osovinu pomoću prstena  $P_1$ . Onda su kroz procijep  $s_1$  umetnuta kod  $a$  oba polucilindrička umetka, pa je uvučen i pritegnut vijak  $V_1$ , pazeći kod toga, da oba polucilindrička umetka ostanu svagdje naokolo slobodno pomični, što je znak, da je magnet  $A$  na unutrašnjoj strani dobro centriran prema osovinu. Zatim su polucilindrički umeci izvađeni, a procijep  $s_1$  između  $A$  i  $B_1$  ispunjen je dvama polukružnim klinovima, pa je mesingani prsten  $P_1$  čvrsto utisnut između osovine i magneta  $A$ , koji je tako i na vanjskoj strani stalno i centrički pričvršćen uz osovinu. To je isto onda ponovljeno na drugoj strani za šuplji magnet  $C$ . Spomenuti polukružni klinovi moraju se umetati između šupljih magneta i srednjeg umetka i kod magnetiziranja ovako složenog magneta, jer inače magnetska sila pokida vijke  $V_1$  i  $V_2$ . Osovina je tako dobro izrađena, da je kod rotacije magneta u rotacionom aparatu ekscentricitet na mjestu srednjeg umetka iznosio 0,3 mm. Nešto su veći bili ekscentriciteti na unutrašnjim stranama magneta  $A$  i  $C$ . Ali tu ekscentriciteti ne zavise toliko o savijanju osovine, koliko o poteškoćama kod pričvršćivanja šupljih magneta uz osovinu. Tu su ekscentriciteti poprečno iznosili 1,0 mm kod magneta  $A$ , 0,6 mm kod magneta  $C$ . — Ovako složeni magnet prikazuje snimka u sl. 12.; srednji umetak u ovoj slici ima na sebi nikaljni oklop, o kojem će odmah biti govora.

U ovakvom sastavu srednji umetak rotira zajedno sa šupljim magnetima kao cjelina. Drugi se dio pokusa sastojao u tome, da su šuplji magneti u po mogućnosti istom položaju oslobođeni od osovine izvlačenjem prstenova  $P_1$  i  $P_2$ , te vijaka  $V_1$  i  $V_2$ , tako da je



onda rotirao samo srednji umetak, dok su  $A$  i  $C$  bili nepomični. U tu svrhu su uz  $A$  i  $C$  bila pripravljena dva učvršćena *Bunsen* ova stalka sa stezaljkama od mesinga, kojima su  $A$  i  $C$  stegnuti i onda oslobođeni od osovine. Kod toga je važno, da se točno održe iste širine procijepa  $s_1$  između  $A$  i  $B_1$ , te procijepa između  $B_1$  i  $C$ , da se ne bi kod prelaza od prvog pokusa na drugi promijenio magnet-ski tok. U tu su svrhu za svaku stranu izrađena po dva lako klínasta umetka, na kojima su označene konture srednjeg umetka i susjednog šupljeg magneta, dok je magnet bio složen u prvom stanju. Pomoću njih su se dale po rastavljanju uspostaviti prvobitne širine procijepa  $s_1$  i  $s_2$  pomicanjem *Bunsen* ovih stalaka s točnošću 0,1 mm. Naravno da je i kod ovih drugih pokusa svaki šuplji magnet na objema stranama bio točno centriran prema osovini.

Za drugu skupinu pokusa izrađen je od mesinga isto takav srednji umetak  $B'_1$ , pa su i na njemu izvedena jednaka mjerenja.

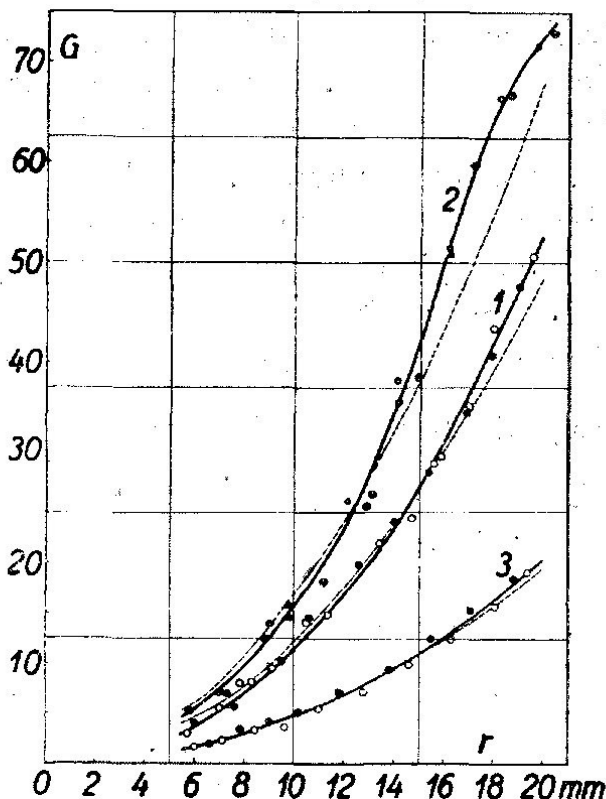
Treća skupina pokusa imala je za cilj ispitivanje raspodjele elektromotorne sile kod užeg procijepa. Da bi se istodobno po mogućnosti umanjio upliv termoelektromotornih sila, oklopljen je srednji umetak od kobaltnog čelika  $B_1$  s obje strane nikalnim limom debljine 1 mm, pa su tako širine procijepa umanjene na 3 mm (sl. 12.). Prema analizi, koju je izveo g. Dr. Matej Ferich u kemijskom zavodu filozofskog fakulteta u Zagrebu, čistoća niklja iznosi 98,89%; onečišćenja sastoje od Fe (0,26%), Al (0,06%), a ostatak od 0,79% otpada na Cu, P i Mn.<sup>336</sup> Promjer nikalnog oklopa iznosi 42 mm, tako da on izlazi iznad srednjeg umetka za 1 mm.

Uz oba opisana namještaja šupljih magneta istražena je raspodjela elektromotorne sile na polumjeru srednjeg umetka u procijepu  $s_1$  za sve tri skupine. Iz razloga navedenih u drugom poglavlju upotrebljavana je u svim ovim mjerenjima doticaljka iz tvrdog mesinga. Njezin vrh bio je savijen u zub visine 2 mm, tako da je doticaljka u procijepu bila slobodna; vrh zuba imao je dodirnu plohu dužine 2 mm, debljine 0,2 do 0,3 mm. Kod rotacije magneta doticaljka ostavlja oštar jasno vidljiv trag čak i na tvrdom kobaltnom čeliku. Različiti položaji doticaljke dolazili su od prilike 1 do 1,5 mm daleko jedan od drugoga. Međutim kod toga nije bilo potrebno voditi nikakvu brigu o tome, da bi ona došla u neke unaprijed određene položaje; samo su pojedini položaji po redu

<sup>336</sup> Čast mi je i na ovom mjestu zahvaliti g. Dr. Mateju Ferichu na ovoj pomoći.

numerirani u zapisniku jednog niza mjerenja. Najprije su izvedena mjerenja s magnetom složenim u prvom sastavu (magneti *A* i *C* pričvršćeni uz osovinu). Zatim je povučen crvenom tintom<sup>337</sup> dosta širok dijametralni potez preko osnovne plohe srednjeg umetka, da bi se novi tragovi, koji će pripadati nizu mjerenja u drugom sastavu, mogli razlučiti od starih tragova iz prvog sastava. Magnet je doveden u drugi sastav i izveden je drugi niz mjerenja u istom procijepu  $s_1$ , pazeći pri tom samo na to, da novi položaji doticaljke dođu između starih tragova. Iza toga je magnet rastavljen, pa su promjeri tragova iz jednog i drugog niza izmjereni mikrometarski pomoću mikroskopa s malenim povećanjem uz rub spomenutih dijametralnih poteza crvenom tintom. Onda je po rednim brojevima u zapisnicima opažanja bilo lako jednoznačno ustanoviti, koje od tako izmjerenih daljina  $r$  i izmjerenih otklona galvanometra u jednom i drugom nizu pripadaju jedno drugome. — Sva su ova mjerenja izvedena uz frekvenciju vrtnje 1,25 okreta/sec.

Rezultati su prikazani krivuljama 1, 2 i 3 u slici 13. Prazni kružići u krivuljama 1 i 3, te kružići s dijametralnim potezom u krivulji 2 pripadaju nizovima mjerenja u prvom sastavu (šuplji magneti rotiraju), a puni kružići u krivuljama 1 i 3, te polupuni kružići u krivulji 2 pripadaju nizovima mjerenja u drugom sastavu (šuplji magneti miruju). Svaka točka odgovara aritmetičkoj sredini



Sl. 13. Radijalna raspodjela inducirane elektromotorne sile u procijepu  $s_1$ . Krivulja 1 = raspodjela na polumjeru srednjeg umetka  $B_1$  među šupljim magnetima ( $s_1 = 4$  mm); 2 = raspodjela na istom srednjem umetku, ali oklopljenom nikalnim limom ( $s_1 = 3$  mm); 3 = raspodjela na mesinganom umetku među šupljim magnetima ( $s_1 = 4$  mm). Crtkane krivulje su parabole.

<sup>337</sup> Crna tinta nije dobra, jer se njezina prašina lijepi uz doticaljku, pa povećava kolebanja galvanometra bilo tim da umanjuje jednolikost termoelektromotorne sile na kontaktnoj plohi ili da stvara promjenljivi otpor.



iz 10 do 20 opažanja otklona galvanometra na lijevo i isto toliko na desno. Kako se vidi, točke iz prvog sastava magneta i točke iz drugog sastava leže unutar granica rasipanja na istoj krivulji. Krivulja 1 pripada mjerenjima sa srednjim umetkom od kobaltnog čelika, krivulja 2 pripada istom srednjem umetku s nikalnim oklopom, a krivulja 3 srednjem umetku od mesinga.

Crtačica izvučene krivulje su parabole, koje se najbolje priljubljuju uz srednje dijelove eksperimentalnih krivulja oko  $r = 13$  do 15 mm. Veća strmina eksperimentalnih krivulja prema parabolama ima dvojaki uzrok. Prvi i možda ovdje glavni razlog leži u tome, što su unutrašnji dijelovi eksperimentalnih krivulja sniženi zbog manje gustoće magnetskog toka u predjelima  $r < 7$  mm, gdje počinju šupljine u šupljim magnetima, a od  $r = 5,5$  mm i u srednjem umetku.<sup>338</sup> Drugi je razlog prirodni porast gustoće magnetskog toka od osi prema površini magneta, koji i puni cilindrički

magneti istog reda veličine za omjer  $\frac{L}{2r}$  pokazuju izvan ekvatorijalne ravnine.<sup>339</sup> Kad se uzme u obzir jedno i drugo, izlazi, da se raspodjela elektromotorne sile unipolarne indukcije po daljini od osi magneta toliko približava paraboli, da bi ona zaista ležala na paraboli, kad bi magnetski tok bio homogen, kako on u ekvatoru punog cilindričkog magneta po Grottrianu približno jest.

Napokon je nađena raspodjela inducirane elektromotorne sile u procijepima unutar granica rasipanja nezavisna o tome, da li se vrti cijeli magnet ili se vrti samo srednji umetak, na kome se mjeri, a vanjski magneti miruju.

## 6. Elektrostatička mjerenja.

Elektrostatičko mjerenje elektromotorne sile inducirane u magnetu, koji se vrti, može se izvesti dvojakim načinom: ili nabijanjem povećeg kondenzatora<sup>340</sup> i njegovim balističkim izbijanjem kroz galvanometar, ili izravnim elektrostatičkim mjerenjem pomoću Dolezalekova elektrometra.

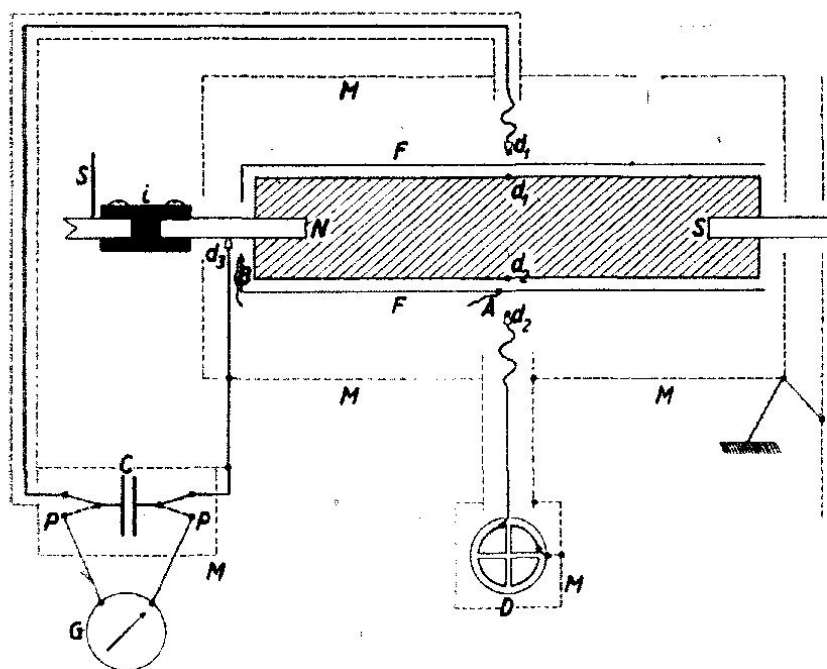
I. Kod prvog je načina balistički otklon proporcionalan sa  $e = C \cdot V$ , pa je uz konstantni kapacitet otklon izravna mjera za

<sup>338</sup> Polumjer šupljine na susjednoj strani šupljeg magneta iznosi 7 mm, a polumjer šupljine u srednjem umetku  $B_1$  5,5 mm.

<sup>339</sup> Grottrian, l. c. <sup>300</sup>

<sup>340</sup> Mogućnost, da se unipolarnom indukcijom nabije kondenzator, predviđao je već G. Th. Fechner, Pogg. Ann. 64, 337, 1845, S. 343—344, Fussn. 1.

elektromotornu silu. Mjerenja su izvedena na punom magnetu. Kao kapacitet je upotrebljena baterija papirnatih kondenzatora sa  $C = 32 \mu\text{F}$ ; njihova ispitna napetost iznosi 800 volta. Baterija je izbijana kroz opisani drugi galvanometar, koji i u otvorenom krugu sporo njiše s velikim prigušenjem, bez predsklopnog otpora (otpor galvanometra  $102 \Omega$ ). Izvjesna bi nesigurnost mogla dolaziti od promjenljivosti otpora u kontaktima preklopa, preko kojih se kondenzator izbija. Međutim se ona može posve zanemariti, s jedne strane zbog sporog njihanja galvanometra, kojemu od početka ba-



Sl. 14. Shema elektrostatičkih mjerenja; a) spoj  $d_1CPPGd_3$ : mjerenje izbijanjem kondenzatora; b) spoj  $d_2DMd_3$ : mjerenje Dolezalekovim elektrometrom D. —  $M$  = uzemljena kovna mreža;  $F$  = cilindar za Swannov pokus;  $i$  = ebonit.

lističkog otklona do povratka kroz nulu treba  $7s$ , s druge strane zbog metode multiplikacije, kojom je prvobitni otklon postepeno povećavan.

Postupalo se ovako (lijevi dio u sl. 14.). Kondenzator  $C$  je preko preklopa  $PP$  bio spojen s doticaljkama, od kojih je ona na osovini magneta bila uzemljena, a druga, montirana na ebonitu, bila je u dodiru s prstenom  $p$  na ekvatoru magneta,<sup>341</sup> koji je rotirao

<sup>341</sup> U slici 14 prsten  $p$  u ekvatoru nije nacrtan zbog cilindra  $F$  za Swannov pokus. U mjerenjima I. i II. skupine ovog poglavlja nema dakako cilindra  $F$ . U slici točka  $d_1$  u ekvatoru magneta simbolički naznačuje spoj prstena  $p$  sa doticaljkom  $d_1$  (I. skupina), a isto tako točka  $d_2$  naznačuje simbolički spoj istog prstena s doticaljkom  $d_2$  u drugoj skupini pokusa.



stalnom malenom frekvencijom. Preklapanjem preklopca kondenzator je izbijen kroz galvanometar  $G$ ; spoj preklopca je održavan, dok galvanometar nije postigao skoro potpun otklon. Onda je preklopac vraćen u početni položaj, pa kad je svjetlosna kazaljka na ljestvici nakon dovršenog njihaja na protivnu stranu ponovno prolazila kroz nulu, kondenzator je ponovno izbijen. Tako je taj postupak ponavljan, dok povećani otkloni galvanometra nijesu postigli konstantnu vrijednost. Ako su:  $a$  balistički otklon,  $b = ka$  amplituda njihaja na protivnoj strani ( $k$  = koeficijent prigušenja),  $m$  faktor multiplikacije otklona, onda zbroj konačnih otklona na suprotnim stranama  $U = ma(1 + k)$  također linearno raste sa  $e = C \cdot V$ . Ovim postupkom postignuti faktor multiplikacije iznosio je  $m = 3,36$ , a baždarenje zbroja  $U$  poznatim napetostima dalo je zaista s najvećom točnošću pravac. Baždarenje je pokazalo, da n. pr. napetost od  $1,968 \cdot 10^{-4}$  volta daje izbijanjem kondenzatora  $C = 32 \mu\text{F}$  uz navedene okolnosti multiplicirani otklon galvanometra  $U = 18,2$  dijela. Prema tome bile su dovoljne male frekvencije vrtnje, da bi se izvela pouzdana mjerenja.

Cijeli preklopac  $PP$  je na ebonitu, a svi dršci na njemu su također od ebonita. Kontakti su mu od platine. Izbijanje praznog kondenzatora kroz galvanometar daje multiplicirane otklone od maksimalno 0,5 dijelova. Toliko dakle iznose smetnje od termoelektromotornih sila na kontaktima u samom preklopcu. Ova elektromotorna sila zajedno sa termoelektromotornim silama na doicaljkama i na drugim dijelovima kondenzatorskog kruga (svega 1 do 2 dijela ljestvice) eliminira se kao u prijašnjim mjerenjima, kad se opažanje ponovi uz preokrenuti smjer vrtnje magneta, pa se uzme aritmetička sredina nađenih otklona.

U predpokusima su se već kod ove vrsti mjerenja pojavile elektrostatičke smetnje, koje su dolazile odatle, što se remen i remenica na drvenom rotacijskom aparatu nabijaju trenjem. Te bi smetnje došle još jače do izražaja u mjerenjima D o l e z a l e k ovim elektrometrom. Zbog toga su remen i remenica ograđeni uzemljenim zastorima od guste mesingane mreže (do  $1024$  oka na  $1 \text{ cm}^2$ ). Magnet je zatvoren u uzemljeni cilindrički oklop od iste takve mreže (promjer cilindra  $14 \text{ cm}$ ), a vod od ekvatora magneta do kondenzatora bio je provučen kroz oklopljenu bužirnu cijev, kojoj je oklop bio uzemljen. Konačno su kondenzator i preklopac bili također opkoljeni uzemljenim oklopom. U slici 14. ovi su elektrostatički zastori naznačeni crtkanim potezima ( $M$ ).

Mjerenja su izvedena uz frekvencije vrtnje magneta 0,631, 0,8368, 1,262 okreta/sec.; to su sredine od po tri mjerenja zapornom urom uz mirnu stroboskopsku sliku na osovini motora. Magnetski tok magneta, izmjeren odmah po završetku niza mjerenja, iznosio je  $2,740 \cdot 10^4$  maksvela. Otkloni  $U$  su sredine od 3 do 4 komutirana mjerenja; pretvoreni su u volte prema pravcu baždarenja. Korektura prstena za svođenje otklona na površinu ekvatora, iznosi za ovaj magnet prema brojnim određivanjima kod mjerenja galvanometrom 1,3%. Rezultati su prikazani u tablici-4. U ovoj tablici  $\Delta E$  znači razliku izmjerene elektromotorne sile, korigirane na površinu ekvatora, prema izračunanoj elektromotornoj sili u postocima.

Tablica 4.

| $f$<br>okreti/sec. | $U =$<br>$= ma \cdot (1 + k)$<br>mm | Elektromotorna sila<br>$\cdot 10^4$ volta |                                 |            | $\Delta E$<br>% |
|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------|------------|-----------------|
|                    |                                     | izmjerena                                 | korigirana na površinu ekvatora | izračunana |                 |
| 0,631              | 16,4                                | 1,73                                      | 1,75                            | 1,729      | + 1,2           |
| 0,8368             | 21,8                                | 2,32                                      | 2,35                            | 2,293      | - 2,5           |
| 1,262              | 31,5                                | 3,38                                      | 3,42                            | 3,458      | - 1,1           |

II. Mjerenja Dolezalekovim elektrometrom izvedena su uz povećanu frekvenciju vrtnje magneta. U tu svrhu uklonjena je zupčasta transmisija, a vrtnja motora prenošena je izravno na manju remenicu drvenog aparata za vrtnju. Na prednjoj osovini magneta namještena je bijela radijalna pruga (S u sl. 14.), koja je bila osvijetljena dvjema tinjalicama, pa je tako frekvencija vrtnje opažana izravno na magnetu. Kod ovih brzih vrtnja pokazale su se nove elektrostatičke smetnje, koje su dolazile iz ležaja na lijevoj glavi magneta, gdje se njegova osovina oslanja na mesingani držak na glavnom Bunsenovu stalku. Po svoj se prilici radilo o povećanju termoelektromotorne sile na dodiru uzemljene doticaljke  $d_3$  s osovino. Da bi se ova smetnja eliminirala, nastavljen je na lijevu osovinu magneta točno centrirani ebonitni valjak  $i$ , koji je na lijevom kraju nosio novu mesinganu osovinu s ležajem. Ovim je sredstvom spomenuta smetnja zaista posve uklonjena.

Dolezalekov elektrometar upotrebljavan je u kvadrant-skom spoju. Igla je vjsjela na kvarcnoj niti, koja je učinjena vod-



ljivom kupanjem u 15 %-noj rastopini kalcijeva klorida. Da bi se osjetljivost održala kroz dulje vrijeme u istim granicama, držan je u oklopu elektrometra trajno komadić navlaženog pamuka na staklenoj pločici. Mjerenje debljine kvarcne niti dalo je  $2r = 6,3\mu$ . Zbog malenog torzionog momenta niti dolazi igla elektrometra u labilno stanje ravnoteže, ako pomoćna napetost prekorači 40 do 44 volta. Otkloni su potpuno aperiodski; igla se vrlo polako skliže, tako da je za postizavanje punog komutiranog otklona kod većih iznosa otklona potrebno skoro  $5^m$ . Komutirani otkloni od 3 do 4 dijela postizavaju se u  $0,5^m$ .

Da bi se osjetljivost dalje povećala, iznosila je daljina ljestvice 518 cm. Na toj daljini elektrometar je nekoliko sati nakon prvog kupanja suspenzije davao kod pomoćne napetosti 34 volta komutirane otklone do 240 mm za 5 mV uz kolebanja do  $\pm 7$  mm. Iza drugog kupanja suspenzije, nakon nekoliko dana, ustalila se je osjetljivost na poprečno 140 mm za 5 mV (komutirano) kod pomoćne napetosti 38 volta. Ali sada su otkloni postali mnogo stalniji, pa su kolebanja opala na maksimalno  $\pm 2,5$  dijelova. Mjerenja inducirane elektromotorne sile između ekvatora i osovine magneta izvedena su u ovom stadiju osjetljivosti, a upliv kolebanja umanjen je većim brojem opažanja.

Da bi se pri ovakvoj osjetljivosti elektrometra mjerenja osigurala od utjecaja vanjskih polja, pojačane su zaštitne mjere, pa je i sama glava elektrometra, na kojoj su spojke kvadranata, natkrivena uzemljenom žičnom mrežom. Kako je elektrometar ležao u daljini 110 cm od ekvatora magneta, vod od ekvatorijalne doticaljke do spojke kvadranta proveden je kroz široku staklenu cijev tankih stijena ( $2r = 28$  mm), koja je oklopljena uzemljenim oklopom od staniola.<sup>342</sup> Uz ove zaštitne mjere su vanjske smetnje kod mjerenja inducirane elektromotorne sile, gdje su kvadranti međusobno spojeni kroz magnet u rotaciji, bile nezamjetljive. Termoelektromotorne sile eliminiraju se komutacijom smjera vrtnje.

Najprije su izvedena mjerenja inducirane elektromotorne sile, pa je neposredno nakon toga snimljen pravac baždarenja u voltima. Kao normala napetosti služio je akumulator, kojemu je napetost izmjerena precizijom universalnim instrumentom Hartmann & Braun. Akumulator i potencijometar s čepovima bili su izo-

<sup>342</sup> Ovako široka cijev bila je potrebna napose zbog Swannova pokusa, da se ne bi previše povećao kapacitet na strani elektrometra.

lirani na parafinskim blokovima, dok je jedan kraj potencijometra bio spojen sa zemljom. Za komutaciju služio je komutator sa živom u parafinu s preklopcem na ebonitnom dršku. Sredine opažanih komutiranih otklona (4 do 5 opažanja za svako mjerenje) u području od 1 do 8,5 mV, u kome leže mjerene inducirane elektromotorne sile, daju nacrtane u velikom mjerilu interpolacijom točno pravac. Cijeli ovakav niz mjerenja i baždarenja trajao je 4 do 5 sati.

Rezultati mjerenja sadržani su u tablici 5. U njoj znače:  $K$  = neposredna opažanja komutiranih otklona,  $K_s$  = njihovu srednju vrijednost, dok  $\Delta E$  ima isto značenje kao u tablici 4. Magnetski tok magneta, izmjeren nekoliko sati prije, iznosio je  $2,711 \cdot 10^4$  maksvela.

Tablica 5.

| $f$<br>okreti/sec. | $K$<br>(mm) | $K_s$<br>(mm) | Elektromotorna sila<br>$\cdot 10^3$ volta |                                       |            | $\Delta E$<br>‰ |
|--------------------|-------------|---------------|-------------------------------------------|---------------------------------------|------------|-----------------|
|                    |             |               | izmjerena                                 | korigirana na<br>površinu<br>ekvatora | izračunana |                 |
| 20,0               | 145,5       | 145,7         | 5,35                                      | 5,420                                 | 5,422      | — 0,037         |
|                    | 145,0       |               |                                           |                                       |            |                 |
|                    | 146,5       |               |                                           |                                       |            |                 |
| 25,0               | 181,5       | 181,9         | 6,66                                      | 6,746                                 | 6,778      | — 0,47          |
|                    | 182,5       |               |                                           |                                       |            |                 |
|                    | 182,0       |               |                                           |                                       |            |                 |
|                    | 181,5       |               |                                           |                                       |            |                 |

Obzirom na vrlo maleno rasipanje među pojedinačnim otklonima možda ne bi bilo pretjerano pripisati realno značenje i okolnosti, da je  $\Delta E$  stalno negativno. Tome bi mogao ležati uzrok u tome, da točka na osovini magneta, gdje ovu dodiruje doticaljka  $d_3$ , nema točno potencijal magnetske osi. Vidi i donji dio krivulje u sl. 7.

III. Swann i Lawrence izveli su svoja mjerenja uz mnogo puta veće jakosti magnetskog toka i uz bitno veće frekvencije vrtnje, koje su kod Swanna išle do 108 okreta/sec., a kod Lawrencea do 80 okreta/sec.<sup>343</sup> Obzirom na veliku osjetljivost Dolezalekova elektrometra, kakva je ovdje postignuta, bilo

<sup>343</sup> Swann, l. c.<sup>232</sup>, p. 50; Lawrence, l. c.<sup>238</sup>, p. 847.



je vrijedno pokušati, može li se S w a n n o v pokus uspješno ponoviti s magnetskim tokom, kojim se raspolagalo u punom magnetu, premda je bilo očekivati, da će rezultati biti na granici opsega smetnja.

U tu svrhu izrađen je valjak od tankog lima, kako je prikazan sa  $F$  u sl. 14., s promjerom 50 mm. Manji promjer uzeti nije bilo uputno zbog bojazni, da u improviziranoj aparaturi, kakva je bila ova, za razliku od specijalne aparature kod S w a n n a i kod L a w r e n c e a, ne bi kod većih frekvencija vrtnje došlo do trešnje, pa bi valjak udarao u magnet. To se zbivalo zaista i s ovim valjkom kod frekvencija vrtnje iznad 25 okreta/sec., premda je valjak bio montiran na debelom štapu od ebonita ( $2r = 18$  mm) koji je pred ulazom u valjak od žične mreže bio još posebno poduprt. Valjak se dao spojiti s elektrometrom ili kod  $A$  ili kod  $B$ . Lijeva osovina magneta bila je preko  $d_3$  spojena sa zemljom kao i u prethodnim mjerenjima.

Najprije je u predpokus iskušana osjetljivost aparature tako, da je magnet izoliran i doveden na određenu napetost, pa je izmjeran otklon elektrometra spojenog sa  $F$  kod  $A$  uz komutaciju napetosti na magnetu. U svrhu izolacije desne osovine magneta izrađen je od ebonita umetak, koji je na jednoj strani imao cilindrički nastavak, koji je ulazio u osovину drvenog rotacionog aparata, dok je na protivnoj strani imao odgovarajuću rupu za osovinu magneta, u kojoj se ona dala učvrstiti.<sup>344</sup> Nabijanje magneta na napetost 6 mV dalo je uz komutaciju otklone od 2,5 do 3 dijela ljestvice; taj otklon postigne elektrometar u  $30^{\circ}$ .

Međutim su se kod izvođenja S w a n n o v a pokusa pojavile nove smetnje, koje mogu da iznose do 80 dijelova ljestvice uvijek na istu stranu, uz kolebanja  $\pm 10$  dijelova kod vrtnje magneta sa 20 okreta/sec. Slutnja da bi se tu moglo bar pretežnim dijelom raditi o termoelektričkoj sili, koja bi nastajala na spojištu elektrometarskog voda na valjku  $F$  zbog promjene temperature, koju izaziva cirkulacija zraka u valjku kod vrtnje magneta, našla je potporu u tome, što se ova smetnja smanjila na kojih 20 dijelova, kad žica elektrometarskog voda nije bila zataljena na valjku, nego su na valjku probijene dvije rupice jedna uz drugu, pa je žica kroz

<sup>344</sup> Izrada ovog nastavka za izolaciju magneta bila je prvobitno namijenjena jednom pokusu s izoliranim magnetom u vrtnji. Taj je pokus napušten, jer je ovaj nastavak dozvoljavao samo kratkotrajne vrtnje do frekvencije od najviše 100/7 okreta u sekundi.

njih provedena i spletena. Ovaj ostatak smetnje nije uspjelo ukloniti. Prema tome je ova zaostala smetnja nadmašivala otklon, koji se mogao očekivati od S w a n n o v a pokusa, okruglo deset puta. Ipak su se u pojedinim opažanjima dali opaziti kod komutacije vrtnje otkloni od 1 do 2 dijela na pravu stranu, ali su oni uskoro bili pokriveni kolebanjima smetnje. Čini se dakle, da se S w a n n o v pokus da uspješno izvesti samo uz velike jakosti magnetskog toka i uz primjereno velike frekvencije vrtnje, tako da smetnje iščezavaju prema pravom otklonu.

Ipak su ova nastojanja oko S w a n n o v a pokusa donijela jedan indirektni dokaz, da se naboji valjka  $F$  ne mogu pripisati jednoj elektromotornoj sili, koja bi se primarno inducirala u vanjskom vodiču. Mjesto D o l e z a l e k o v a elektrometra uklopljen je između valjka  $F$  i uzemljene osovine magneta kondenzator  $C$  s galvanometrom kao u odsjeku I., pa je primijenjena metoda multiplikacije. Pokazalo se, da se dobiveni maleni balistički otklon galvanometra nije dao multiplicirati, kako bi to bilo, da je dolazio od indukcije u vanjskom vodiču; dapače se on kod ritmičkih izbijanja kondenzatora pomalo umanjivao. Ova okolnost upućuje na to, da je taj opaženi naboj dolazio od spomenutih smetnja. Istina je, načelno bi se tako trebao vladati i otklon, koji bi dolazio od S w a n n o v a naboja; međutim zbog posve nepovoljnog omjera kapaciteta djelovanje S w a n n o v a naboja ne bi u opće moglo doći do izražaja.

## 7. Blondelov pokus.

Zakon indukcije u H e r t z o v o m integralnom obliku:

$$\oint \mathfrak{E} ds = - \frac{1}{c} \frac{d}{dt} \int \mathfrak{B}_n df \quad (9)$$

vrijedi i za tjelesa u gibanju. On vrijedi za tjelesa u gibanju i po L o r e n t z o v o j teoriji elektrona, pa i u slučaju, da krug sadrži magnetskih točaka.<sup>345</sup>

Porast magnetskog toka u jedinici vremena

$$\frac{d}{dt} \int \mathfrak{B}_n df = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (10)$$

<sup>345</sup> H. A. Lorentz, Encyklop. d. math. Wissensch. V, 14, §§ 42, 49.



kroz plohu obrubljenu krivuljom  $s$  možemo rastaviti u dva sumanda: u sumand  $\left(\frac{d\Phi}{dt}\right)_m$ , koji dolazi u vremenski promjenljivom polju od same promjene magnetskog toka kroz vremenski stalnu plohu  $f$  u miru, i u sumand  $\left(\frac{d\Phi}{dt}\right)_t$ , koji dolazi od promjene površine plohe zbog gibanja krivulje  $s$ .<sup>346</sup> Ako je dakle gustoća magnetskog toka po sebi vremenski stalna i po vrijednosti i po smjeru, ostaje samo ovaj drugi sumand. Označimo u njemu sa  $\Phi_1$  magnetski tok obuhvaćen plohom jednog uzvoja, sa  $N$  broj jednakih uzvoja, koji pojedinačno obuhvaćaju taj isti magnetski tok. Onda je cijeli magnetski tok kroz površinu obuhvaćenu sa  $N$  uzvoja:

$$\Phi = N \Phi_1 \quad (11)$$

Ispustimo indeks drugog sumanda, pa pretpostavimo, da se broj uzvoja  $N$  mijenja. Onda imamo:

$$-\frac{d(N\Phi_1)}{dt} = -\Phi_1 \frac{dN}{dt} \quad (12)$$

pa se postavlja pitanje, da li se inducira elektromotorna sila, ako se mijenja broj uzvoja, koji obuhvaćaju konstantni magnetski tok.<sup>347</sup>

Blondel<sup>347</sup> je pokusima dokazao, da se takva elektromotorna sila inducira samo onda, ako pri promjeni broja uzvoja jedan dio žice reže indukcijone linije.<sup>348</sup> Inducirana elektromotorna sila je pak onda upravo jednaka elektromotornoj sili induciranoj samim rezanjem.<sup>349</sup> Drugi Blondelov zaključak<sup>350</sup> odnosi se na krugove sa skliznim kontaktima, kad bi se jedan takav kontakt pomicao bez rezanja indukcijonih linija; u Blondelovim kontrolnim pokusima uz glavni pokus ovaj se drugi zaključak podudara s Faradayevom pretpostavkom, da se kod unipolarne indukcije elektromotorna sila inducira u dijelovima, koji se gibaju.<sup>351</sup> — Di-

<sup>346</sup> Abraham, l. c., Bd. I, 7. izd. (1923.), S. 370.

<sup>347</sup> A. Blondel, C. R. 159, 674, 1914.

<sup>348</sup> Blondel, ibid., p. 678: »Il ne peut y avoir de force électromotrice induite dans un circuit, par un champ magnétique invariable, que si la déformation du circuit fait couper des lignes de force par une portion mobile de ce circuit«.

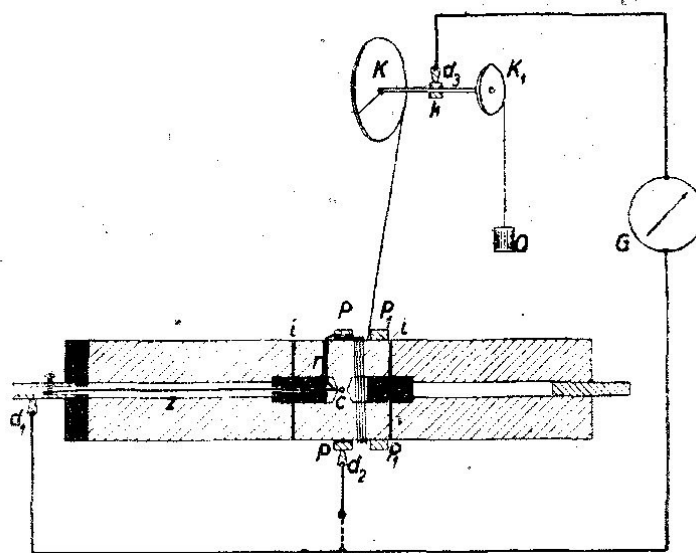
<sup>349</sup> Blondel, ibid., p. 677.

<sup>350</sup> Blondel, ibid., p. 678: »Il n'est pas équivalent que la ligne de fermeture d'un circuit se déplace dans un circuit massif entre des contacts mobiles ou que le conducteur massif se déplace lui-même«.

<sup>351</sup> Faraday's Diary, § 11396 u vezi s pokusima opisanim u §§ 11397 do 11404. — Vidi napomenu <sup>351</sup>.

skusija o ovom pokusu između Robertsona,<sup>352</sup> Jakemana<sup>353</sup> i Blondela<sup>354</sup> dostupna mi je samo u izvatku kod Celeria.<sup>355</sup>

Crampa i Norgrove<sup>356</sup> su u spomenutoj njihovoj radnji izveli — kako izgleda nezavisno od Blondelova pokusa<sup>357</sup> — pomoću cilindričkog magneta za unipolarnu indukciju niz pokusa, koji u stvari znače varijantu Blondelova pokusa, pa i oni dolaze do istog rezultata kao prvi Blondelov zaključak.<sup>358</sup> Ova



Sl. 15. Shema Blondelova pokusa na složenom magnetu u izoliranom sastavu.

varijanta od Crampa i Norgrovea ima prema prvobitnoj Blondelovoj izvedbi prednost veće jednostavnosti uz mogućnost jednake točnosti; a i preglednija je. Ako su sami autori pri tom postigli manju točnost, nego ju iskazuju Blondelova mjerenja,<sup>359</sup> razlog leži u nekim pojedinostima njihove aparature, koje se dadu izbjeći. Već je Blondel istaknuo važnost svog pokusa za tumačenje unipolarne indukcije, u koliko njegovim negativnim

<sup>352</sup> D. Robertson, The Electrician od 18. VI. 1915, p. 402.

<sup>353</sup> R. G. Jakeman, ibid., 25. VI. 1915, p. 441.

<sup>354</sup> A. Blondel, ibid., 6. VIII. 1915, p. 671.

<sup>355</sup> F. Celeri, l. c.<sup>35b</sup>, p. 183—184. — Po njemu su navedeni i literaturni podaci u napomenama 352 do 354.

<sup>356</sup> Cramp a. Norgrove, l. c.<sup>247</sup>, Sect. 14 (p. 487—489), Sect. 15/IX.

<sup>357</sup> Cramp a. Norgrove, ibid., posljednji redak na str. 488.

<sup>358</sup> Cramp a. Norgrove, ibid., p. 489, Sect. 15/IX: »When tubes of induction are linked without being cut, no e. m. f. results«.

<sup>359</sup> Opažana elektromotorna sila, za koju bi se naprečac moglo uzeti, da bi odgovarala promjeni  $dN/dt$ , iznosi kod Crampa i Norgrovea još uvijek 5% elektromotorne sile inducirane rezanjem indukcijonih linija. U stvari to je parasitna elektromotorna sila  $e$ , o kojoj će biti govora.



rezultatom otpadaju ona tumačenja, koja unipolarnu indukciju pripisuju porastu magnetskog toka obuhvaćenog jednom tangencijalnom trajektorijom u rotaciji.<sup>360</sup> Izvedba ovog pokusa u varijanti Crampa i Norgrova dopušta neposrednu primjenu



Sl. 16. Snimka aparature za Blondelov pokus.

Blondelovih zaključaka na spomenuto Mieovo tumačenje unipolarne indukcije.<sup>361</sup> Zbog toga sam izveo Blondelov pokus pomoću složenog magneta u izoliranom sastavu. Pregled elektro-

<sup>360</sup> Blondel, l. c., p. 679.

<sup>361</sup> Mie, l. c. 273.

motornih sila, koje kod toga dolaze ili mogu doći u obzir, pokazao je, da se i shema mjerenja da pojednostaviti. Aparatura je prikazana shematski u sl. 15., a snimkom u sl. 16.

Crne plohe i i u sl. 15. znače izolacije kao i u sl. 2. Izolirani srednji umetak složenog magneta nosi u ekvatoru izolirano mesingani prsten  $P$  (identičan sa  $p_i$ ), a blizu svog desnog kraja normalni prsten  $P_1$ , tako da između njih ostaje cilindrički žlijeb širine 6 mm, u kome se namata žica kod vrtnje magneta. Izolirana radijalna žica  $r$  iz središta srednjeg umetka provučena je kroz rupicu u izoliranom prstenu  $P$ , pa se nastavlja u izoliranu žicu ( $2r = 0,25$  mm), koja se u žlijebu namata oko magneta i dalje ide oko drvenog koluta  $K$ , koji je na rubu užlijebljen. Kraj žice zataljen je na kovnoj osovinu ovog koluta. Udaljenost osi koluta  $K$  od magneta iznosila je 110 cm. Osovina koluta nosi mesingani prsten  $k$ , na koji se naslanja mesingana doticaljka  $d_3$ , spojena s galvanometrom  $G$ . Na drugom kraju iste osovine je manji užlijebljeni kolut  $K_1$ , na kome je namotan jak postolarski konac, a na ovome visi utez  $Q = 0,5$  kg\*, čiji statički momenat drži žicu  $PK$  jednako nategnutom. Motor preko zupčaste tranzmisijske vrti magnet konstantnom malenom frekvencijom. Aksijalna žica  $z$  spaja središte srednjeg umetka s izoliranom osovinom na lijevom kraju magneta.

Da se omogući dovoljan broj uzvoja žice oko magneta i s tim dovoljno trajanje pokusa, utez  $Q$  imao je slobodnu visinu padanja 210 cm, a polumjeri kolutova  $K$  i  $K_1$  bili su tako odabrani, da su tom visinom padanja bila omogućena 33 okreta magneta, t. j. 33 uzvoja žice oko njega. Dok se magnet vrtio jednim smjerom, dolazila su opažanja kod odmatanja žice s magneta (padanje utega) i kod namatanja žice (dizanje utega) jedno za drugim. Pokusi su izvedeni s frekvencijama vrtnje magneta  $f = 0,597$  okreta/sec. (skupina mjerenja  $A$ ) i  $f = 0,896$  okreta/sec. (skupina mjerenja  $B$ ), pa je jedan niz opažanja (33 okreta) trajao  $55,3^s$ , dotično  $36,8^s$ , a to je u oba slučaja bilo dovoljno, da bi se u jednom nizu izvelo po nekoliko čitanja otklona galvanometra.

Sasvim je nebitnog značaja okolnost, da je pokus ovako izveden na složenom magnetu i s radijalnom žicom  $r$ . Tim pokus samo dobiva više sličnosti s B l o n d e l o v o m izvedbom. Posve isto je, ako se pokus izvede na punom magnetu s neizoliranim prstenom u ekvatoru. Razlike između ovog uređaja i onog kod C r a m p a i N o r g r o v e a su u tome, što se ovdje žica namata izravno oko



magneta, te što magnet u svakom slučaju rotira, bilo da je doticaljka  $d_1$  spojena s galvanometrom ili doticaljka  $d_2$ . Obje razlike su nebitne.

U obzir dolaze slijedeće elektromotorne sile: a) elektromotorna sila  $U$ , koja nastaje unipolarnom indukcijom u radijalnoj žici u magnetu i u dijelu mesinganog prstena do rupice. Dakle je u stvari  $U = U' - p'$ , gdje je  $p'$  ta elektromotorna sila, koja se inducira u prstenu do rupice; b) hipotetička inducirana elektromotorna sila  $u = -\Phi_1 \frac{dN}{dt}$  od promjene broja uzvoja na magnetu; c) parasitna elektromotorna sila  $\pm e$ , koja se inducira rezanjem vanjskog magnetskog toka zbog promjena polumjera pri prelazu s jednog sloja žice na drugi i zbog promjena daljine žice od ekvatorijalne ravnine; iz ovoga slijedi za nju, da mora biti promjenljiva; d) termoelektromotorne sile  $T$  na dodirnim ploham doticaljki. — Može se zanemariti elektromotorna sila, koja se inducira okretanjem i namatanjem žice na kolutu  $K$ .

U spoju  $d_1 G d_3 k P r c z d_1$  prolazi kroz galvanometar struja od svih ovih elektromotornih sila. U spoju  $d_2 G d_3 k P d_2$  otpada unipolarno inducirana elektromotorna sila  $U'$  iz radijalne žice, a mjesto  $p'$  ulazi elektromotorna sila  $p$  iz cijelog prstena  $p$  (daljina  $r \doteq 5$  mm od površine ekvatora). — Elektromotorna sila  $p'$  manja je od eksperimentalnih smetnja, pa se može zanemariti.

Prema smjeru vrtnje magneta dolaze kod namatanja i odmatanja žice na magnetu u spoju  $d_1 G d_3 k P r c z d_1$  elektromotorne sile u slijedećim sastavima. Predznaci komponenata odgovaraju Flemingovu i Maxwellovu pravilu, ali su u toliko samovoljno definirani, u koliko su odabrani prema smjerovima otklona galvanometra u upotrebljenom spoju.

a) Rotacija magneta na lijevo; žica se na njemu namata:

$$E_1 = -U - u + e + T; \quad (a)$$

b) Rotacija magneta na lijevo; žica se odmata s njega:

$$E_2 = -U - u - e + T; \quad (b)$$

c) Rotacija magneta na desno; žica se na njemu namata:

$$E_3 = +U + u - e + T; \quad (c)$$

d) Rotacija magneta na desno; žica se s njega odmata:

$$E_4 = +U + u + e + T. \quad (d)$$

Odatle:

$$E_1 + E_2 = -2(U + u - T)$$

$$E_3 + E_4 = 2(U + u + T)$$

i konačno:

$$U + u = \frac{(E_3 + E_4) - (E_1 + E_2)}{4} \quad (13)$$

Analogno dobivamo za srednju vrijednost parasitne elektromotorne sile:

$$\bar{e} = \frac{E_4 - E_3 + E_1 - E_2}{4} \quad (14)$$

U spoju galvanometra  $d_2 G d_3 k P d_2$  otkloni su vrlo maleni, kako se vidi iz niže navedene tablice. Za ista četiri slučaja kao gore imamo slijedeće elektromotorne sile:

$$E'_1 = p - u + e + T$$

$$E'_2 = p - u - e + T$$

$$E'_3 = -p + u - e + T$$

$$E'_4 = -p + u + e + T$$

Odatle je:

$$u - p = \frac{(E'_3 + E'_4) - (E'_1 + E'_2)}{4} \quad (15)$$

Napokon spajanjem galvanometra s doticaljkama  $d_1$  i  $d_2$  mjerimo neposredno elektromotornu silu  $U' - p$ .

Izvedene su dvije skupine mjerenja. U skupini A upotrebljen je galvanometar manjeg otpora ( $50 \Omega$ ), pa su kolebanja otklona izjednačena velikim brojem opažanja. Skupina B izvedena je drugim galvanometrom uz predsklopni otpor  $300 \text{ B. A. U.}$  Rezultati su prikazani u tablici 6. Brojevi znače otklone u milimetrima. Da bi se opažene vrijednosti  $U' - p$  mogle usporediti s vrijednostima  $U + u$ , vrijednosti  $U' - p$  svedene su na isti otpor kruga kao u mjerenjima za  $E$  i  $E'$ ; otpor žice PK iznosio je  $2,37 \Omega$ .

Tablica 6.

|           | $E_2$         | $E_1$  | $E_4$  | $E_3$  | $E'_2$        | $E'_1$ | $E'_4$ | $E'_3$ | $U + u$    | $-p + u$ | $U' - p$ |
|-----------|---------------|--------|--------|--------|---------------|--------|--------|--------|------------|----------|----------|
|           | o p a ž a n o |        |        |        | o p a ž a n o |        |        |        | izračunano |          | opažano  |
| Skupina A | -182,8        | -182,2 | +188,0 | +187,1 | -0,5          | -0,9   | + 5,0  | + 4,5  | 185,0      | 2,9      | 184,5    |
| Skupina B | -156,2        | -154,7 | +167,1 | +166,2 | +9,1          | +7,5   | +12,   | +11,8  | 161,0      | 1,9      | 159,5    |



U skupini *A* srednja pogreška pojedinačnih opažanja za  $E_1$  do  $E_4$  iznosi poprečno  $\mu = \pm 2,5$  mm, a srednja pogreška aritmetičke sredine  $\mu_x = \pm 0,3$  mm. U skupini *B* za  $E_1$  do  $E_4$  je poprečno  $\mu = \pm 0,65$  mm,  $\mu_x = \pm 0,12$  mm.

Izravna opažanja suprotne elektromotorne sile  $p$  na prstenu dala su otklone u redu veličine 2 mm. Prema tome hipotetička elektromotorna sila  $u = -\Phi_1 \frac{dN}{dt}$  zaista ne postoji. — Srednji otklon od parasitne elektromotorne sile  $\bar{e}$  leži između 0,3 i 0,5 mm, pa je manji od smetnja.

Ovaj rezultat primijenjen na *Mie* ovo tumačenje unipolarne indukcije pokazuje, da indukcija povećavanjem magnetskog toka pomoću odvijanja užeg ekvatorijalnog područja cilindričke površine magneta nikako ne dolazi u obzir. Preostalo bi dakle samo odvijanje cilindričkog plašta u predjelima bližim krajevima i odvijanje čeone plohe, gdje je komponenta gustoće magnetskog toka okomita na površinu  $\mathfrak{B}_z > 0$ . Međutim su mjerenja u 4. poglavlju pokazala, da elektromotorna sila ostaje nepromijenjena, ako se ova područja posve izoliraju od galvanometarskog kruga. Isto tako je pokazano, da je površina magneta ekvivalentna ma kojem čunjastom presjeku magneta, kojemu je vrh bilo gdje na osi, a njegova izvodnica, koja je općenito zakrivljena, prolazi kroz ekvator. Prema tome površini magneta ne pripada nikakva bitna uloga za unipolarnu indukciju.<sup>362</sup>

Negativni rezultat *Blondel*ova pokusa nepovoljno pogađa i *Mie* ovu formulaciju općenitog zakona indukcije, isto kao što je u ono doba nepovoljno pogodio formulacije tog zakona kod *Mascarta* i *Jouberta*,<sup>363</sup> te kod *Chwolsona*.<sup>364</sup> Jer po *Mie* u inducirana elektromotorna sila (»Spannung«) »jednaka je ukupnoj promjeni magnetskog toka u sekundi kroz plohu obuhvaćenu vodičem«. <sup>365</sup> Kao primjer te plohe obuhvaćene vodičem *Mie* uzima

<sup>362</sup> Naprotiv vidi također: R. W. Pohl, Einf. i. d. Elektrizitätslehre, 4. izd., Berlin 1935; 5. izd., Berlin 1940, S. 86: »Hier tritt die Oberfläche des Stabes an die Stelle des bewegten Bleches in Abb. 185. Sie wird von den Feldlinien der Polgebiete durchsetzt«.

<sup>363</sup> E. Mascart et J. Joubert, Leçons sur l'électr. et le magnét., T. I, Paris 1882, p. 565, 567.

<sup>364</sup> O. D. Chwolson, Lehrb. d. Phys., Bd. IV/2, 1. Abt., Braunschweig 1913, S. 235, 237.

<sup>365</sup> G. Mie, l. c. 273, S. 288: »Die gesamte in einem geschlossenen Leiter durch seine Bewegung im magnetischen Feld und durch zeitliche Änderung dieses Feldes induzierte Spannung ist gleich der gesamten Änderung des Kraftflusses

jednoslojnu cilindričku uzvojnici, iz koje se po njemu smije os izbaciti, pa je ukupna ploha jednaka zbroju pločica, od kojih je svaka obuhvaćena jednim uzvojem. Očito je, da je i u toj formulaciji potreban *Blondelov* dodatak, koji kaže, da se promjena magnet-skog toka ima izvoditi ili rezanjem silnica ili promjenom magnet-skog polja, koje inducira.<sup>366</sup> Bez toga ona ne obuhvaća unipolarne indukcije ni u užem ni u širem smislu.

Konačno obzirom na spomenute posebne, pa i odlučne uloge, koje su često pripisivane skliznim kontaktima, treba nadodati, da jednakost rezultata za  $U + u$ , dobivenih u spoju galvanometra  $d_1 G d_3 k P r c z d_1$ , gdje u ekvatoru nema skliznog kontakta, sa rezultatima za  $U' - p$ , gdje je struja uzimana iz skliznog kontakta na ekvatoru, pokazuje, da za unipolarnu indukciju sklizni kontakti nijesu neophodno potrebni. Jer kako je već prije naglašeno, sklizni kontakt na osovini još je manje potreban.

## 8. Upliv stranog magnetskog toka na unipolarnu indukciju.

Kod *F a r a d a y a* nalazimo samo na jednom mjestu niz pokusa, koje treba pribrojiti amo. To je u poglavlju 11653 *Dnevnika*, gdje on opisuje niz pokusa, u kojima je uz upotrebu najboljih eksperimentalnih sredstava, kojima je raspolagao, istražio, da li potkovasti magnet, primaknut do na 1,5 palca jednim ili drugim polom njegovom magnetu, koji se vrtio zajedno sa svojom vanjskom žicom, upliva na negativni rezultat tog njegova osnovnog pokusa.<sup>367</sup> Nije našao otklona galvanometra u nijednoj varijanti ovog niza pokusa.

Ovi pokusi nijesu spomenuti u XXVIII. nizu *Eksperimentalnih Istraživanja*. *K a l i s c h e r* u svom prevodu *F a r a d a y e* prikaza o istraživanjima sadržanim u XXVIII. nizu završuje *šesti* odlomak, koji je posvećen upravo spomenutom osnovnom pokusu,<sup>367</sup> ovako:<sup>368</sup> »Die Nähe anderer Magnete änderte die Wirkung nicht, vorausgesetzt dass sie während der Versuche nicht bewegt wurden; es liess sich so mit Sicherheit feststellen, dass solche Magnete die

<sup>366</sup> *Blondel*, l. c., p. 679: »et quand la variation est produite soit par le balayage des lignes de force par le conducteur, soit par une variation du champ inducteur lui-même«.

<sup>367</sup> Vidi drugo poglavlje ove radnje pod a). — Crtnja uz § 11653 prikazuje i vanjski zatvoreni krug. Ali pojedinosti ove crtnje upućuju na to, da su njom naznačene različite varijante. Pozivanje na § 11583 pokazuje, da se radilo i o osnovnom pokusu (§ 11584).

<sup>368</sup> *S. Kalischer*, l. c. 1, Bd. III, S. 369.



Wirkung des der Untersuchung unterworfenen nicht störten«. Po ovome bi se činilo, da se ovo mjesto odnosi upravo na spomenute pokuse iz poglavlja 11653 Dnevnika.

Međutim u početku ove radnje navedeno izdanje Faradaye-  
evih Eksperimentalnih Istraživanja,<sup>369</sup> koje imam pred sobom, ne donosi ovo mjesto na kraju šestog odlomka, nego istom na kraju sedmog odlomka, koji je posvećen većim dijelom indukciji zemaljskim magnetnim poljem.<sup>370</sup> Kalischerov prevod ovog mjesta dosta je dobar.<sup>371</sup> Jedva da bi moglo biti sumnje u to, da ovo mjesto pripada onamo, kamo ga stavlja englesko nepromijenjeno izdanje, premda je opet nerazumljivo, zašto bi ga Kalischer premjestio drugamo. Stvar ima izvjesnu važnost zbog toga, jer ove rečenice dobivaju posve drugi smisao prema mjestu, gdje se nalaze. Na Kalischerovu mjestu ograda sadržana u riječima »provided they were not moving during the experiment« stoji u izravnom sukobu s rezultatima u spomenutom poglavlju 11653 Dnevnika. Jer tamo Faraday kaže i ovo: »The horse shoe magnet was turned pole for pole, but still no effect«; dakle bilo je gibanja vanjskog magneta za vrijeme pokusa. Međutim nije bez prigovora ovo mjesto ni na kraju sedmog odlomka, gdje se nalazi u engleskom originalu. Jer »this magnet« i magnet »that under investigation« slabo pristaju uz sadržaj sedmog odlomka, t. j. uz indukciju zemaljskim magnetnim poljem, u koliko se taj magnet ne dovede u vezu s § 3088 u XXVIII. nizu.<sup>371a</sup> —

Weber je našao, da se unipolarna indukcija pojačava, ako se u produženju rotirajućeg magneta smjesti sa svake strane po jedan pomoćni magnetski štap tako, da se nasuprot polova magneta nalaze suprotni polovi pomoćnih magneta. On je takvo pojačavanje

<sup>369</sup> L. c. 1, *facsimile-reprint*. Godina ponovnog otiska nije navedena.

<sup>370</sup> Početak sedmog odlomka u vezi je i sa § 3088 u XXVIII. nizu, a sadržaj cijelog odlomka prikazuje rezultate XXIX. niza.

<sup>371</sup> Original glasi: »The vicinity of other magnets to this magnet made no difference in the effect, provided they were not moved during the experiments; and in this manner the noninterference of such magnets with that under investigation was fully established«.

<sup>371a</sup> Šesti odlomak citira Plücker (l. c. 85), ali donosi od njega samo prve 3/4. Poggendorff nije preveo ove Faradayeve radnje. Ove dvije okolnosti spominjem zato, jer postoji još i ta mogućnost, da je Kalischer ovu radnju preveo izravno iz *Proc. Roy. Inst.*, gdje je prvi put izašla, a promjena u originalu da je nastala kod pretiska odatle u *Exper. Res.*, pa bi ona prema tome imala pripadati među one promjene »nur redaktioneller Natur«, koje spominje Kalischer u predgovoru III. sveska svog prevoda. Dakle rješenje bi se našlo samo poredbom s radnjom u *Proc. Roy. Inst.*

izdašno primijenio u nekim svojim nizovima mjerenja. Polazeći sa svog shvaćanja unipolarne indukcije, Weber je ovim postupkom išao za tim, da bi pojačao magnetizam krajeva rotirajućeg magneta.<sup>372</sup>

Lecher je rotirajući elektromagnet nesimetrično oklopio željezom (gore i dolje, te na oba čela), pa je tim postigao 3,5 puta jaču unipolarnu indukciju.<sup>373</sup>

Ulogu ovih Weberovih i Lecherovih dodataka igra željezni oklop, kojim su oklopljeni neki tehnički unipolarni generatori, n. pr. Poirsonov dinamo.

Cramp i Norgrove istražili su kvalitativno upliv vanjskog magneta ili željeznog štapa, koje su primaknuli postrance rotirajućem magnetu više-manje paralelno s njim.<sup>374</sup> Našli su, da se otklon galvanometra povećava, ako su susjedni polovi pomoćnog magneta suprotni polovima rotirajućeg magneta, a da se otklon umanjuje, ako su susjedni polovi pomoćnog magneta istoimeni s polovima rotirajućeg magneta. I primicanje željeznog štapa izaziva povećavanje otklona galvanometra u manjem iznosu.

1. *Opći tok pojava.* Još kod prvih predpokusa za ovaj niz istraživanja našao sam, da kvalitativno iste učinke poput ovih kod Crampa i Norgrove izaziva potkovasti magnet, koji primaknemo ekvatorijalnoj zoni rotirajućeg magneta tako, da njegovi polovi leže u ravnini jednog meridijana rotirajućeg magneta otprilike simetrično prema njegovom ekvatoru. Ako su polovi potkovastog magneta okrenuti prema *suprotnim* polovima rotirajućeg magneta, tako da se smjer ovog stranog magnetskog toka u ekvatorijalnoj zoni podudara sa smjerom magnetskog toka rotirajućeg magneta u njegovoj unutrašnjosti, unipolarna indukcija se *pojačava*. Ako su polovi potkovastog magneta okrenuti prema *istoimenim* polovima rotirajućeg magneta, tako da je u ekvatorijalnoj zoni smjer stranog magnetskog toka suprotan smjeru magnetskog toka rotirajućeg magneta, unipolarna indukcija se *slabi*. Mi ćemo prvi položaj zvati *položajem* sa suprotnim polovima, a drugi *položajem* s istoimenim polovima.

Pojave sam kvantitativno istražio u zavisnosti o jakosti stranog magnetskog toka pomoću malenog potkovastog elektromagneta

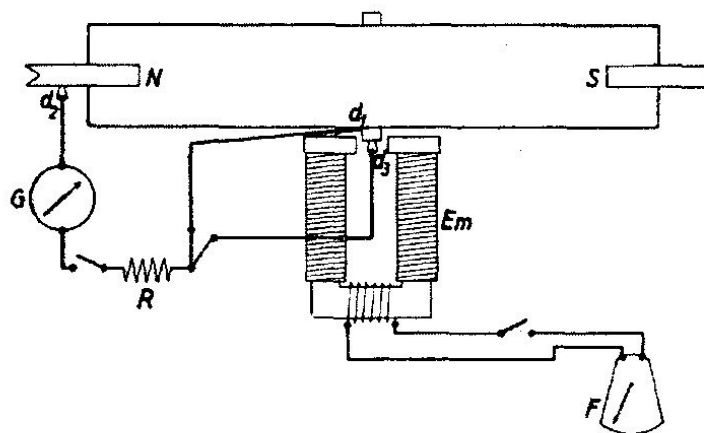
<sup>372</sup> W. Weber, l. c. 3; vidi njegov prvi zakon na str. 361 i razlaganje na str. 369—371.

<sup>373</sup> E. Lecher, Wiener Ber., l. c. 156, S. 964—966.

<sup>374</sup> Cramp a. Norgrove, l. c. 247, p. 486, Sect. 11; p. 491, Sect. 17.



- Em*, koji je u horizontalnoj meridijanskoj ravnini rotirajućeg magnetu namješten simetrično prema njegovom ekvatoru (sl. 17). Elektromagnet je imao na svojim glavama željezne polne nastavke ( $20 \times 12,5 \times 6,5 \text{ mm}^3$ ), koji su svojim širim ploham ( $20 \times 12,5 \text{ mm}^2$ ) bili okrenuti prema rotirajućem magnetu. Razmak među polnim nastavcima iznosio je 12 mm. Prema tome, kad je kao magnet upotrebljen složeni magnet u izoliranom sastavu, svaka ploha polnog nastavka elektromagneta sezala je prema glavama magnetu još za 7,5 mm preko izolacije *i*, kojom je srednji umetak duljine 37 mm bio odijeljen od šupljih magnetu *A* i *C*, koji su lijevo i desno nastavljeni na njega (sl. 2). Izrađene su tolerancije, pomoću kojih su polne plohe u svim mjerenjima namještane na istoj daljini



Sl. 17. Shema pokusa o utjecaju stranog magnetskog toka; *Em* = elektromagnet; *G* = galvanometar; *F* = Grassotov fluksmetar.

od pobočja magnetu (3,5 mm) s točnošću 0,1 mm. Stalak, koji je nosio elektromagnet, bio je tako učvršćen, da je i kod jakosti struje 7 A u uzvojnici pomak elektromagneta prema magnetu, ako ga je u opće bilo, bio manji od 0,1 mm. Ovo je kontrolirano u svakom nizu mjerenja počevši od jakosti struje 3 A. Tim je osigurano, da u istom nizu mjerenja smijemo opažanja pri slabim strujama u uzvojnici elektromagneta uspoređivati s opažanjima kod jačih struja, kao i to, da se različiti nizovi mjerenja smiju uspoređivati međusobno.

Tako je istražen upliv stranog magnetskog toka na punom magnetu i na složenom magnetu u izoliranom sastavu. Magnet je u svim ovim mjerenjima rotirao frekvencijom 0,6603 okreta/sec. Upravo ovdje se jako osjećala potreba neposredne upotrebe doticaljke na samoj površini magnetu. Ali se zbog prije opisanih poteškoća moralo ostati pri upotrebi mesinganog prstena u ekvatoru i mesin-

gane doticaljke na njemu, premda indukcija u samom prstenu čini znatnih poteškoća kod svodenja otklona na površinu ekvatora. Doticaljka u ekvatoru mogla je doći u dva glavna položaja prema ravnini elektromagneta: ili se nalazila među samim polnim nastavcima (»azimut nula«) ili se nalazila u azimutu  $90^\circ$  prema ravnini elektromagneta (»azimut  $90^\circ$ «). Azimut  $180^\circ$  nije istraživao. Spomenuta poteškoća kod svodenja na površinu magneta naročito se ističe kod azimuta  $90^\circ$ , jer je tu inducirana elektromotorna sila u prstenu malena, pa je određivanje korekture za različite jakosti struje u elektromagnetu nepouzđano.

Da bi se tome izbjeglo, primijenjeno je, obzirom na velik predsklopni otpor (300 B. A. U.) u krugu galvanometra, i ovdje isto sredstvo, koje je upotrebljavano i u nekim istraživanjima iz prethodnih poglavlja: mjesto široke doticaljke na plaštu prstena uzeta je klinasta doticaljka (poglavlje 2.) sa zubom debljine 0,3 mm, duljine 2 do 3 mm, zataljena na pruži mesinganog lima uzdužno tordiranoj za  $90^\circ$ . Ona je dodirivala mesingani prsten sa strane uz samu površinu magneta, koji je bio obložen jednoličnim trakom celuloida debljine 0,2 mm, da bi se izbjegao izravan dodir doticaljke s površinom magneta. Na taj način doticaljka je dodirivala prsten otprilike u daljini 0,4 mm od površine magneta. Korektura za ovu debljinu prstena zanemarena je, jer se nije dala pouzđano izmjeriti. Ona je i po sebi malena, pa u položaju suprotnih polova kod azimuta  $90^\circ$  može iznositi oko 0,1 dijela ljestvice, a u položaju istoimenih polova pri azimutu nula i pri jakosti struje u uzvojnici elektromagneta 7 A ona je manja od 1 dijela ljestvice. —

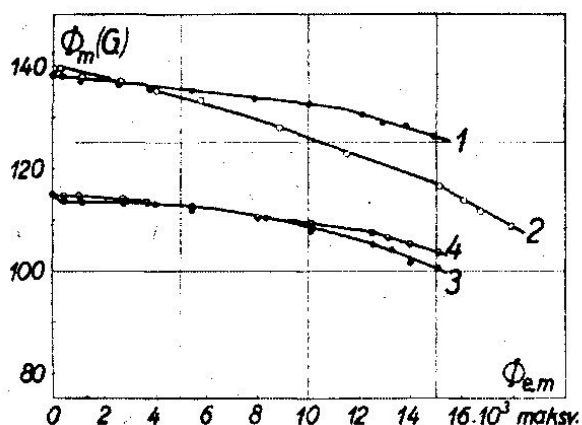
Opći tok upliva stranog manetskog toka ide ovako. Ako pojačavamo jakost struje u elektromagnetu, otklon galvanometra raste, ako je elektromagnet u položaju suprotnih polova, a opada, ako je elektromagnet u položaju istoimenih polova. Kod jedne dane jakosti struje u elektromagnetu otklon galvanometra ostaje dugo vremena stalan, tako da se mjerenja kod te jakosti struje mogu ponavljati u više navrata. Međutim svako *ново* pojačavanje magnetskog toka elektromagneta izaziva slabljenje vlastitog magnetskog toka  $\Phi_m$  kobaltnog magneta<sup>375</sup> bez razlike, da li je elektromagnet u položaju istoimenih polova ili u položaju suprotnih polova. Razlika

<sup>375</sup> Kod toga zanemarujemo nepravilnosti, koje se javljaju kod najmanjih jakosti struje u elektromagnetu, jer po stvar nemaju daljeg značaja. Vidi početke krivulja u sl. 18.



je samo u tome, što u položaju istoimenih polova  $\Phi_m$  naglije opada. Mjera za preostali magnetski tok  $\Phi_m$  je otklon galvanometra od normalne unipolarne indukcije  $U''$ , u spoju galvanometra  $d_1 G d_2$ , ako magnet rotira bez uzbuđenja elektromagneta; pretpostavlja se, da je taj otklon sveden na površinu magneta, dotično na prsten debljine 0,4 mm. Kod toga elektromagnet ostaje na svom mjestu, pa bi trebalo uzeti u obzir i upliv njegovog remanentnog magnetizma, koji iznosi poprečno 1,5 do 2 dijelova ljestvice. Taj je upliv zbog njegove promjenljivosti zanemarivan.

Prema tome u jednom nizu mjerenja svaka skupina opažanja, koja određuje jednu točku u diagramima, sastojala se od mjerenja magnetskog toka  $\Phi_{e,m}$  sustava elektromagnet-kobaltne magnet uz danu jakost struje u elektromagnetu; zatim od mjerenja unipolarne



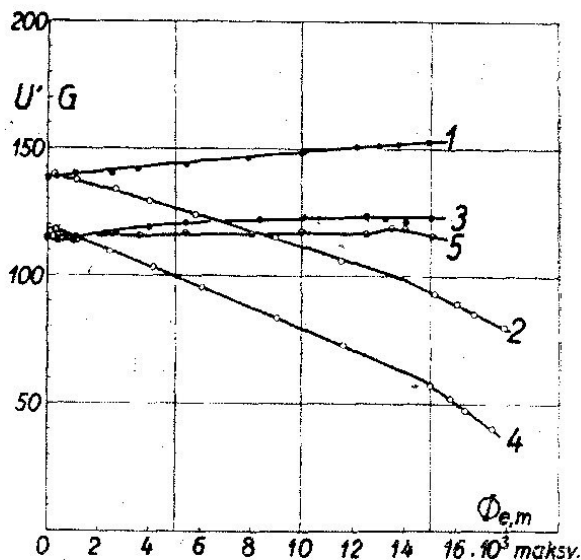
Sl. 18. Opadanje magnetskog toka  $\Phi_m$  pod uplivom stranog magnetskog toka  $\Phi_{e,m}$ . Krivulja 1 = puni magnet, položaj suprotnih polova; 2 = isti magnet, položaj istoimenih polova; 3 = složeni magnet u izoliranom sastavu, položaj suprotnih polova; 4 = isti magnet, isti položaj polova, površinski spoj.

indukcije u kobaltnom magnetu kod iste jakosti struje u elektromagnetu, te na kraju od mjerenja ostatka magnetskog toka  $\Phi_m$  kobalnog magneta pomoću unipolarne indukcije uz neuzbuđeni elektromagnet. Krivulje u slici 18. odgovaraju ovoj trećoj skupini mjerenja. U njima je dakle prikazano opadanje magnetskog toka  $\Phi_m$ , mjerenog unipolarnom indukcijom uz neuzbuđeni elektromagnet, nakon što je elektromagnet dotle, za vrijeme mjerenja iz prve i druge skupine, bio uzbuđen danom jakošću struje. Krivulje 1 i 2 snimljene su na punom, a krivulje 3 i 4 na složenom magnetu u izoliranom sastavu. Nadalje krivulje 1, 3 i 4 pripadaju položaju suprotnih, a krivulja 2 položaju istoimenih polova. Mjesto jakosti struje u elektromagnetu uzete su kao apscise vrijednosti spomenutog magnetskog toka  $\Phi_{e,m}$ , o kojemu će niže biti govora.

Posljedica ovakvog opadanja magnetskog toka  $\Phi_m$  je ta, da se mjerenja izvedena pri nižim jakostima magnetskog toka  $\Phi_{e,m}$  ne daju reproducirati nakon primjene većih jakosti tog magnetskog

toka. Zbog toga su sva opažanja provedena prelazeći od manjih jakosti struje u elektromagnetu na veće; t. j. krivulje u svima diagramima teku od lijeva na desno.

Krivulje u slici 19. prikazuju neposredna opažanja ( $U'$ ) gore spomenutog općeg toka unipolarne indukcije  $U'$  uz uzbuđeni elektromagnet kod različitih jakosti struje u elektromagnetu, dotično za različite vrijednosti magnetskog toka  $\Phi_{e,m}$ , i to za puni magnet (krivulje 1 i 2) i za složeni magnet u izoliranom sastavu (krivulje 3 i 4). Opažanja su samo korištena na površinu ekvatora, dotično na prsten debljine 0,4 mm. Krivulje 1 i 3 odgovaraju položaju suprotnih, a krivulje 2 i 4 položaju istoimenih polova, sve za azimut nula. Međutim jasno je, da je porast krivulja 1 i 3 usporen istodobnim opadanjem magnetskog toka  $\Phi_m$ , dok je opadanje krivulja 2 i 4 s istog razloga izašlo strmije. Da bi se dobio pravi pregled nad promjenama, potrebno je dakle ovakva opažanja  $U'$  još svesti na početnu vrijednost  $\Phi_{m0}$  magnetskog toka kobaltnog magneta, koja odgovara početnom odklonu galvanometra, dok je elektromagnet još bio neuzbuđen, ali se nalazio na svom mjestu uz magnet.



Sl. 19. Promjene odklona galvanometra ( $U'$ ) pod uplivom stranog magnetskog toka  $\Phi_{e,m}$ , sve za azimut nula. Krivulja 1 = puni magnet, položaj suprotnih polova; 2 = isti magnet, položaj istoimenih polova; 3 = složeni magnet u izoliranom sastavu, položaj suprotnih polova; 4 = isti magnet, položaj istoimenih polova; 5 = isti magnet, položaj suprotnih polova, površinski spoj.

2. *Pomoćna mjerenja.* a) *Magnetski tok  $\Phi_{e,m}$ .* Da bi se dobio bolji pregled nad cijelim tokom pojava, bilo je potrebno prije svega izvesti neka magnetska mjerenja u magnetskom sustavu, koji se sastoji od kobaltnog magneta i elektromagneta. Oko neutralne zone *elektromagneta* namotana je uzvojnica od 20 uzvoja, pa su Grass-ovim fluksmetrom ( $F$  u sl. 17.) izmjerene vrijednosti magnetskog toka  $\Phi_e$  elektromagneta, dok je on bio daleko od kobaltnog magneta, za različite jakosti struje uz naglo spajanje i rasklapanje. Zatim je elektromagnet doveden u propisani stalni čvrsti položaj



prema kobaltnom magnetu, koji je bio magnetiziran skoro do maksimuma. Opet je, kao kod mjerenja magnetskog toka  $\Phi_e$ , naglim spajanjem i naglim rasklapanjem struje izmjereno fluksmetrom magnetski tok elektromagneta za različite jakosti struje, dok je magnet mirovao. Taj magnetski tok sada zavisi i o magnetskom toku kobalnog magneta, a naročito o polaritetu polova elektromagneta prema polovima magneta. Posebno zavisi o ovom polaritetu način prodiranja magnetskog toka elektromagneta u kobaltni magnet. Mi ćemo tako izmjerene *magnetski tok elektromagneta* označivati sa  $\Phi_{e,m}$ , naznačujući tim njegovu zavisnost o magnetskom sustavu elektromagnet-kobaltni magnet. U tom smislu treba razumijevati i naziv »magnetski tok sustava elektromagnet-kobaltni magnet«, koji ćemo upotrebljavati za  $\Phi_{e,m}$  premda taj naziv ne odgovara posve, jer  $\Phi_{e,m}$  dakako ne obuhvaća vlastiti magnetski tok  $\Phi_m$  kobalnog magneta.

U stvari se kod ovakvog načina mjerenja magnetskog toka  $\Phi_{e,m}$  radi o kompliciranijim pojavama, koji s druge strane ni ne odgovaraju posve onome, što se zbiva u ovom sustavu elektromagnet-kobaltni magnet, kada kobaltni magnet rotira. Ta ista zamjerka ovom postupku, kao i slijedeća, vrijedi i za istraživanje o »prodiranju« stranog magnetskog toka u kobaltni magnet, na koje ćemo doći.

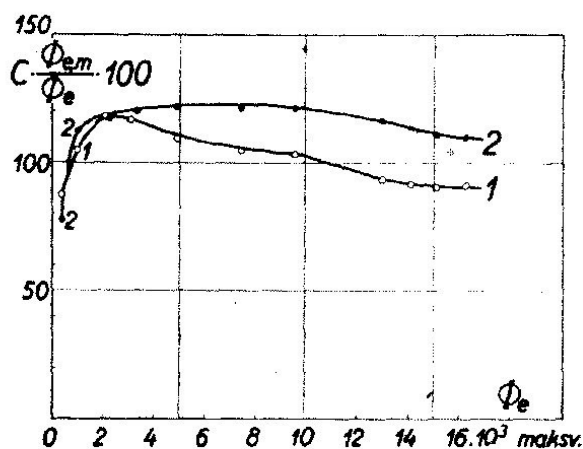
Dok kobaltni magnet rotira, promjene njegove magnetičnosti, koje odgovaraju krivulji opadanja unipolarne indukcije bez struje u elektromagnetu, bit će i ostat će zbog velike koercitivne sile aksijalno simetrički raspoređene. Na mirnom kobaltnom magnetu promjena magnetičnosti pod uplivom elektromagneta je jednostrana, pa pojačavanje stranog magnetskog toka iz elektromagneta nalazi u kobaltnom magnetu drukčije prilike, nego kad kobaltni magnet rotira. S druge strane kod ovakvog načina mjerenja, pomoću sklapanja i rasklapanja struje u elektromagnetu, fluksmetar mjeri i utjecaj magnetskog toka vrtložnih struja, koje se kod toga rađaju u magnetu kao masivnom vodiču. Treba dakako i to pripomenuti, da je raspored *ovih* vrtložnih struja posve drugi nego raspored vrtložnih struja, koje izaziva strani magnetski tok u kobaltnom magnetu, dok ovaj rotira. Plošnu rasprostranjenost ovih posljednjih u ekvatorijalnoj ravnini magneta, koji rotira, imamo zamišljati kvalitativno sličnom plošnoj raspodjeli vrtložnih struja u Faraday evoj ploči. Razlika će biti u obliku putanja struje obzirom

na okolnost, da cijela putanja u magnetu stoji pod uplivom gustog, skoro homogenog magnetskog toka samog magneta.

Prema tome ovakvo istraživanje magnetskog toka  $\Phi_{e,m}$ , kao i istraživanje o prodiranju stranog magnetskog toka u kobaltne magnet, imaju samo izvjesnu informativnu vrijednost, kolika je bila potrebna za ciljeve glavnog istraživanja. Upliv vrtložnih struja smijemo ipak bar u užim područjima izvan skokova magnetičnosti, koji su u vezi s histerezom kobalnog čelika, smatrati krupno proporcionalnim s jakošću stranog magnetskog toka. U tom bi smislu trebalo podatke opažanja magnetskog toka sustava elektromagnet-kobaltne magnet na fluksmetru označiti sa  $C_1 \cdot \Phi_{e,m}$ , gdje je  $C_1$  neka konstanta proporcionalnosti. Mi uzimamo vrijednosti  $\Phi_{e,m}$  kao apscise u diagramima o unipolarnoj indukciji, postavljajući  $C_1 = 1$ .

U slici 20. krivulje 1 i 2 prikazuju porast magnetskog toka  $\Phi_{e,m}$  prema magnetskom toku  $\Phi_e$  elektromagneta, kako su ga dala ovakva mjerenja pomoću fluksmetra. Krivulja 1 snimljena je u položaju suprotnih polova, a krivulja 2 u položaju istoimenih polova. Iste apscise  $\Phi_e$  odgovaraju za obe krivulje istim jakostima struje u elektromagnetu. Samo do  $\Phi_e = 3,35 \cdot 10^3$  maksvela

istim jakostima struje odgovaraju u položaju suprotnih polova nešto manji magnetski tokovi  $\Phi_e$  nego u položaju istoimenih polova, kako se to vidi iz pomaka praznih kružića u krivulji 1 na lijevo prema punim kružićima u krivulji 2. To je posljedica re-manencije u elektromagnetu. Skoro posve isti tijek imaju i krivulje snimljene sa složenim magnetom pri jednako udaljenosti elektromagneta. Rasipanje vrijednosti za različite nizove mjerenja u području iznad 5000 maksvela zahvaća jedinice, pa kod punog magneta jedva prelazi pogreške od nesigurnosti čitanja desetinki na ljestvici fluksmetra. Kod složenog magneta rasipanja su nešto veća.



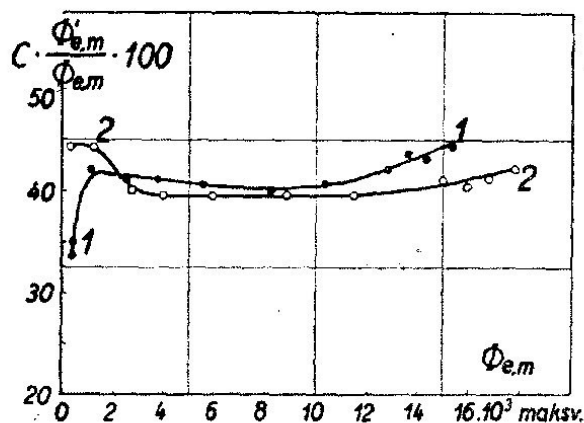
Sl. 20. Porast magnetskog toka  $\Phi_{e,m}$  prema magnetskom toku  $\Phi_e$ ; krivulja 1 = položaj suprotnih polova; 2 = položaj istoimenih polova.



Kako se vidi iz ovih krivulja, položaju istoimenih polova od  $\Phi_e = 2,2 \cdot 10^3$  maksvela na više stalno odgovaraju veće vrijednosti  $\Phi_{e,m}$ . Tome odgovara u diagramima za  $U$ ,  $U'$  i za  $\Phi_m$  veće protezanje krivulja na desno za položaj istoimenih polova. — Iznimka, koju pokazuju krivulje 1 i 2 do  $\Phi_e = 0,4 \cdot 10^3$  maksvela može dolaziti od remanencije u elektromagnetu, kao i od nesigurnosti u čitanju desetinki na ljestvici fluksmetra. Međutim obje krivulje do  $\Phi_e \approx 2,5 \cdot 10^3$  maksvela zaista pokazuju izvjesna veća kolebanja. Ova će biti u vezi s histerezom vanjskih slojeva kobalnog magneta, koje se upliv javlja i u krivuljama unipolarne indukcije do  $\Phi_{e,m} \approx 2000$  maksvela (vidi krivulje 2 i 3 u slici 18 i krivulje 3 i 4 u slici 19.).

*b) Prodiranje stranog magnetskog toka u kobalni magnet.*

Da bi se istražilo prodiranje magnetskog toka elektromagneta u

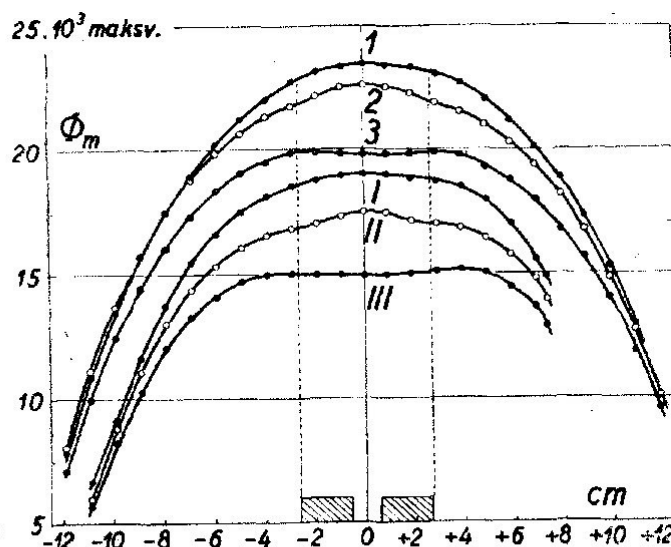


Sl. 21. Prodiranje stranog magnetskog toka u ekvatorijalnu zonu kobalnog magneta. Krivulja 1 = položaj suprotnih polova; 2 = položaj istoimenih polova.

ekvatorijalnu zonu kobalnog magneta, najprije su balistički otkloni aperiodičkog galvanometra (bez predsklopnog otpora) kod sklapanja i rasklapanja struje elektromagneta baždareni u maksvelima pomoću Grassotova fluksmetra. Kod toga su oko ekvatorijalnog područja elektromagneta bile namotane dvije uzvojnice, od kojih je jedna bila spojena sa fluksmetrom, a druga sa galvanometrom. Zatim je elektro-

magnet doveden u njegov propisani položaj prema kobaltnom magnetu. Uzvojnica od 5 uzvoja namotana je oko ekvatora kobalnog magneta i spojena je s galvanometrom, dok je uzvojnica s 20 uzvoja oko ekvatorijalnog područja elektromagneta ostala spojena sa fluksmetrom. Kod spajanja i rasklapanja struje elektromagneta ova druga uzvojnica mjeri, kao gore, magnetski tok  $\Phi_{e,m}$ , dok otkloni galvanometra daju relativnu mjeru za prodiranje tog magnetskog toka u ekvatorijalnu zonu kobalnog magneta ( $\Phi'_{e,m}$ ). U stvari, i ovdje su tim obuhvaćeni nepoznati magnetski tokovi vrtložnih struja, koje kod toga nastaju u magnetu.

U krivuljama 1 i 2 slike 21. prikazani su rezultati ovakvih mjerenja o prodiranju  $\Phi'_{e,m}$  magnetskog toka u puni kobaltne magnet u postojećima magnetskog toka  $\Phi_{e,m}$  za različite jakosti struje u elektromagnetu, dotično za različite vrijednosti toka  $\Phi_{e,m}$ . Krivulja 1 odgovara položaju suprotnih, a krivulja 2 položaju istoimenih polova. Uz posve iste uslove izvedena su ovakva mjerenja i za složeni magnet u izoliranom sastavu. Krivulje za taj magnet teku paralelno s nacrtanim krivuljama 1 i 2, za neko 0,5 % ispod ovih. Zato su se točke ovih mjerenja do  $2 \cdot 10^3$  maksvela, gdje je točnost manja, dale upotrebiti kao pomoćne točke kod povlačenja krivulja 1 i 2 za puni magnet.



Sl. 22. Raspodjela magnetskog toka uzduž magneta. Krivulje 1, 2, 3 vrijede za puni magnet, krivulje I, II, III za složeni magnet u izoliranom sastavu. Krivulje 1 i I prikazuju neporemećenu raspodjelu, krivulje 2 i II raspodjelu poslije vrtnje u položaju suprotnih polova, krivulje 3 i III raspodjelu poslije vrtnje u položaju istoimenih polova;  $i = 0 \rightarrow 7,0$  A.

c) *Poremećena raspodjela magnetskog toka na kobaltnom magnetu.* Napokon su istražena poremećenja, koja vanjski magnetski tok elektromagneta proizvodi u raspodjeli magnetskog toka  $\Phi_m$  uzduž kobaltnog magneta, koji je za vrijeme djelovanja elektromagneta rotirao. Uzduž kobaltnog magneta nacrtana je ljestvica u centimetrima. Magnet je simetrično magnetiziran sa 50 A u uzvojnici za magnetiziranje. Uska uzvojnica s 20 uzvoja u dva sloja (unutrašnji promjer 44 mm, širina navoja srednje 6,5 mm) spojena je s Grassotovim fluksmetrom. Ona je naglo dovedena na glavu magneta, pa je odatle u skokovima pomicala centimetar po centimetar uzduž magneta, a u svakom njezinom položaju na



magnetu pročitano je stanje na fluksmetru. Tako dobivene raspodjele magnetskog toka na normalno magnetiziranom magnetu prikazane su u slici 22. krivuljama *I* (puni magnet) i *II* (složeni magnet u izoliranom sastavu). Laka nesimetrija u svim krivuljama prema ekvatoru (O) dolazi od neizbježivih sklizanja kazaljke kod namještanja uzvojnice na danom dijelu ljestvice. Uzvojnica je naime kod toga pomicala uvijek istim smjerom od slobodnog kraja magneta prema učvršćenom kraju. Svaka točka je sredina od 3 do 4 opažanja suprotnih otklona. Spomenutom namještanju uzvojnice treba pripisati i znatno sniženje maksima krivulja *I* i *II* prema pravom stanju, koje je za puni magnet davalo okruglo 27000 maksvela, a za složeni magnet okruglo 21000 maksvela.

Zatim je elektromagnet doveden u svoj propisani položaj prema kobaltnom magnetu, pa dok je ovaj rotirao, postepeno je pojačavana struja u elektromagnetu do njezine maksimalne jakosti 7 A. Kod toga je magnet pri svakoj jakosti struje rotirao naizmjenice na lijevo i na desno, isto kao kod opažanja unipolarne indukcije pod uplivom stranog magnetskog toka (u svrhu eliminiranja termostruja). Na taj način ne može biti sumnje o tome, da je elektromagnet proizvodio u kobaltnom magnetu jednaka aksijalno simetrična poremećenja magnetičnosti kao kod analognih pokusa o unipolarnoj indukciji. Magnet je za svako mjerenje iznova magnetiziran s istom jakosti struje u uzvojnici za magnetiziranje (50 A), tako da su razlike postignutih magnetskih tokova bile manje od 0,1%.

Rezultati su prikazani u ostalim krivuljama slike 22., gdje krivulje 2 i 3 vrijede za puni magnet, a krivulje *II* i *III* za složeni magnet u izoliranom sastavu. Krivulje 2 i *II* odgovaraju položaju suprotnih, a krivulje 3 i *III* položaju istoimenih polova. Pravo-kutnici iznad apscisne osi pokazuju dužinu i položaj polnih nastavaka elektromagneta. Općenito se opaža, da elektromagnet jače djeluje na složeni magnet, što je bilo i očekivati zbog magnetskog prekida na dvama mjestima.

Kako se vidi iz krivulja 2 i *II*, u položaju suprotnih polova, gdje strani magnetski tok prolazi kroz ekvatorijalno područje magneta istim smjerom kao vlastiti magnetski tok magneta, krivulja raspodjele poremećenog magnetskog toka dobiva u ekvatoru magneta izbočinu. Na ovu se lijevo i desno nastavljaju uleknine, koje odgovaraju slabljenju vlastitog magnetskog toka pod uplivom su-

protnog smjera stranog magnetskog toka iz vanjskih krajeva polnih nastavaka u područjima prema polovima magneta. — U položaju istoimenih polova, kod kojega je smjer stranog magnetskog toka u ekvatorijalnoj zoni magneta suprotan smjeru vlastitog magnetskog toka magneta, dobivaju se krivulje 3 i III, koje su oko ekvatora duboko usedlane. Izbočine, koje se na to područje nastavljaju lijevo i desno kod  $\pm 3,5$  cm, kao i očevидno povišena grana krivulja lijevo od — 4, odgovaraju područjima, gdje strani magnetski tok ima u magnetu isti smjer kao njegov vlastiti magnetski tok. — Stvaranje slijednih polova za stvar je od sporedne važnosti.

3. *Pregled rezultata.* U tablici 7. prikazani su tok jednog od prije opisanih nizova glavnih mjerenja unipolarne indukcije pod uplivom stranog magnetskog toka i njegovo svođenje na početni magnetski tok  $\Phi_{m_0}$  kobaltnog magneta. Ovdje su :  $i$  = jakost struje u uzvojnici elektromagneta;  $\Phi_{e,m}$  = magnetski tok sustava elektromagnet-magnet određen Grassotovim fluksmetrom, koji je spojen s uzvojnicom od 20 uzvoja oko ekvatorijalnog područja elektromagneta;  $U'$  = odklon galvanometra od unipolarne indukcije u spoju  $d_1 G d_2$ ;  $\Phi_{m_0}$  = početna vrijednost magnetskog toka  $\Phi_m$ , mjerena odklonom  $U'$  za  $i = 0$ ;  $\Phi_m$  = ostatak magnetskog toka kobaltnog magneta, mjeran unipolarnom indukcijom  $U''$  u istom spoju galvanometra, nakon što je struja kroz uzvojnici elektromagneta bila isključena;  $k = \frac{\Phi_{m_0}}{\Phi_m}$  = faktor redukcije odklona  $U'$  na početni magnetski tok  $\Phi_{m_0}$ ;  $U$  = unipolarna indukcija  $U'$  svedena na početni magnetski tok  $\Phi_{m_0}$ .

Otkloni  $U'$  svedeni na početni magnetski tok  $\Phi_{m_0}$ , t. j. vrijednosti  $U$ , u zavisnosti o magnetskom toku  $\Phi_{e,m}$  poredavaju se i za položaj suprotnih polova i za položaj istoimenih polova na jednom slomljenom pravcu. Prelomi takvih pravaca leže i za puni i za složeni magnet u istim područjima; i to u položaju suprotnih polova nalaze se u području  $\Phi_{e,m} \sim 11 \cdot 10^3$  do  $13 \cdot 10^3$  maksvela, a u položaju istoimenih polova u području  $\Phi_{e,m} \sim 13 \cdot 10^3$  do  $15 \cdot 10^3$  maksvela. U jednom i u drugom položaju ova područja leže u jednom te istom području jakosti struje u uzvojnici elektromagneta, između 3 i 4 A. Pravci za azimute  $90^\circ$  uvijek se razlikuju smjerom od pravaca za azimute nula, tako da su pravci za azimut  $90^\circ$  uvijek strmiji od pravaca za azimut nula. U položaju suprotnih polova



pravci za azimut  $90^\circ$  strmije se penju, u položaju istoimenih polova oni se strmije spuštaju. Ove razlike daleko nadilaze rasipanja vrijednosti. U slici 23. takvi su pravci prikazani za položaj suprotnih polova, i to pravac  $A$  odgovara punom magnetu za azimut

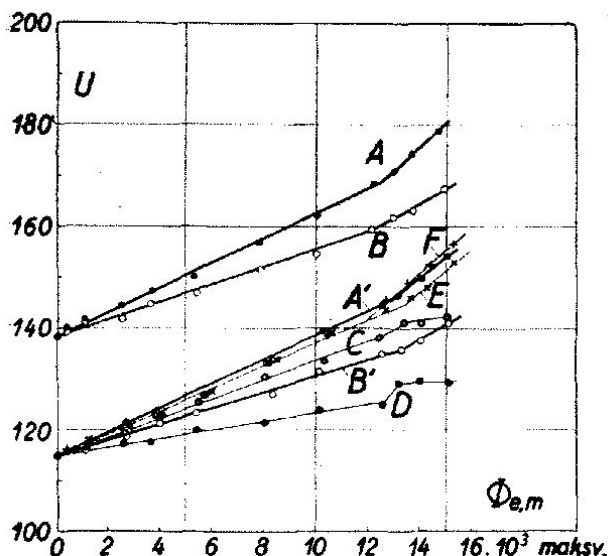
Tablica 7.<sup>376</sup>

| $i$<br>( $A$ ) | $\Phi_{e,m}$<br>$\cdot 10^{-4}$ maksv. | $U'$  | $\Phi_{m_0}$ | $\Phi_m$ | $k$                   | $U$   |
|----------------|----------------------------------------|-------|--------------|----------|-----------------------|-------|
| 0              | 0 <sup>377</sup>                       | 138,2 | <b>138,2</b> | 138,2    | 1                     | 138,2 |
| 0,1            | 0,035                                  | 138,9 |              | 138,0    | $\frac{138,2}{138,0}$ | 139,1 |
| 0,25           | 0,105                                  | 140,1 |              | 137,1    | $\frac{138,2}{137,1}$ | 141,2 |
| 0,5            | 0,25                                   | 140,0 |              | 136,4    | $\frac{138,2}{136,4}$ | 141,9 |
| 0,7            | 0,36                                   | 142,3 |              | 135,5    | $\frac{138,2}{135,5}$ | 144,9 |
| 1,0            | 0,54                                   | 143,9 |              | 135,4    | $\frac{138,2}{135,4}$ | 146,9 |
| 1,5            | 0,785                                  | 146,5 |              | 133,7    | $\frac{138,2}{133,7}$ | 151,5 |
| 2,0            | 1,00                                   | 148,1 |              | 132,6    | $\frac{138,2}{132,6}$ | 154,4 |
| 3,0            | 1,21                                   | 150,4 |              | 130,6    | $\frac{138,2}{130,6}$ | 159,2 |
| 4,0            | 1,295                                  | 150,8 |              | 129,0    | $\frac{138,2}{129,0}$ | 161,6 |
| 5,0            | 1,37                                   | 151,9 |              | 128,8    | $\frac{138,2}{128,8}$ | 163,0 |
| 7,0            | 1,49                                   | 152,8 |              | 126,2    | $\frac{138,2}{126,2}$ | 167,3 |

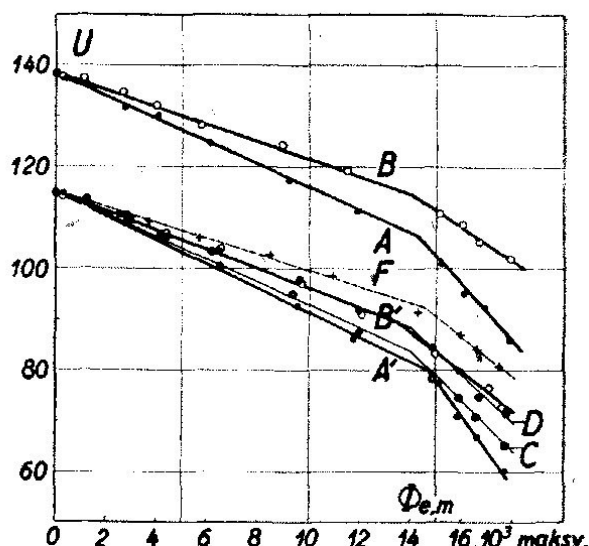
<sup>376</sup> Puni magnet, položaj suprotnih polova, azimut  $0^\circ$ ;  $\Phi_{m_0} = 2,682 \cdot 10^4$  maksvela (sredina od 5 dvostrukih mjerenja fluksmetrom). — Vrijednosti  $U'$  prikazane su krivuljom 1 u sl. 19, vrijednosti  $\Phi_m$  krivuljom 1 u sl. 18, vrijednosti  $U$  krivuljom  $A$  u sl. 23.

<sup>377</sup> Za  $i = 0$  uzima se, da je  $\Phi_{e,m} = 0$ , t. j. zanemaruje se početni magnetski tok elektromagneta u njegovom položaju prema kobaltnom magnetu.

$90^\circ$ , a pravac  $B$  istom magnetu za azimut nula.<sup>378</sup> U slici 24. takvi su pravci prikazani za položaj istoimenih polova, pa i ovdje pravac  $A$  odgovara punom magnetu za azimut  $90^\circ$ , a pravac  $B$  istom magnetu za azimut nula.<sup>378</sup>



Sl. 23. Porast elektromotorne sile  $U$ , svedene na početni magnetski tok  $\Phi_{m_0}$ , u položaju suprotnih polova. Pravac  $A$  = puni magnet, azimut  $90^\circ$ ;  $B$  = isti magnet, azimut nula. — Pravac  $A'$  = složeni magnet u izoliranom sastavu, ekvatorijalno-aksijalni spoj, azimut  $90^\circ$ ;  $B'$  = isti magnet, isti spoj, azimut nula;  $C$  = isti magnet, površinski spoj, azimut  $90^\circ$ ;  $D$  = isti magnet, isti spoj, azimut nula;  $E$  = isti magnet, unutrašnji spoj, azimut  $90^\circ$ ;  $F$  = isti magnet, isti spoj, azimut nula.



Sl. 24. Opadanje elektromotorne sile  $U$ , svedene na početni magnetski tok  $\Phi_{m_0}$ , u položaju istoimenih polova. Pravac  $A$  = puni magnet, azimut  $90^\circ$ ;  $B$  = isti magnet, azimut nula. — Pravac  $A'$  = složeni magnet u izoliranom sastavu, ekvatorijalno-aksijalni spoj, azimut  $90^\circ$ ;  $B'$  = isti magnet, isti spoj, azimut nula;  $C$  = isti magnet, površinski spoj, azimut  $90^\circ$ ;  $D$  = isti magnet, isti spoj, azimut nula;  $F$  = isti magnet, unutrašnji spoj, azimut nula.

Mjesto, na kome se pravci prelamaju, nalazimo već i na nereduciranim krivuljama unipolarne indukcije  $U'$  u sl. 19., a nalazimo ga i na krivuljama opadanja magnetskog toka  $\Phi_m$  u slici 18. U krivuljama o prodiranju stranog magnetskog toka u kobaltu magnet (sl. 21.) to je mjesto karakterizirano početkom jačeg uspona krivulje, a nazrijevamo ga i u krivuljama za  $\Phi_{e,m}$  u slici 20. Okolnost, da ga nalazimo tako oštro izražena i u krivuljama o

<sup>378</sup> Početne vrijednosti  $U'$  za  $\Phi_{e,m} = 0$  nijesu bile uvijek posve jednake. Reducirane vrijednosti  $U$  su zbog toga nakon redukcije još toliko paralelno pomaknute, da je  $U$  za  $\Phi_{e,m} = 0$  kod svih nizova palo u  $U = 138,2$ . Isto tako su u nizovima mjerenja na složenom magnetu pravci paralelno pomaknuti u početnu točku  $U = 115,0$  za  $\Phi_{e,m} = 0$ . Takvi su paralelni pomaci učinjeni i za krivulje u sl. 18. i 19.



opadanju magnetskog toka  $\Phi_m$ , upućuje na to, da mu je uzrok posvuda isti. Krivulje za  $\Phi_m$  kod položaja suprotnih polova u području iza točke preloma pokazuju strmiji pad, a takvo povećanje strmine još je bolje izraženo kod položaja istoimenih polova. Po svoj prilici radi se o jednom skoku u krivulji histereze unutrašnjih slojeva magneta u onim njegovim područjima, gdje je strani magnetski tok u magnetu *suprotan* smjeru vlastitog toka magneta. Posljedica takvog skoka je povećanje permeabilnosti, a s tim povećanje prodiranja stranog magnetskog toka u magnet prema krivuljama u slici 21. — Manji skokovi na više ili na niže, kakve susrećemo do  $\Phi_{e,m} \approx 2 \cdot 10^3$  maksvela, a koji su često jako istaknuti u nereduciranim krivuljama za  $\Phi_m$  i za  $U'$ , stoje dijelom u vezi s remanentnim magnetizmom elektromagneta. Ali čini mi se, da tu mogu igrati znatnu ulogu slični skokovi u krivulji histereze u vanjskim slojevima magneta, koji su jače izloženi djelovanju stranog magnetskog toka. —

Ovakva ista mjerenja izvedena su i na složenom magnetu u izoliranom sastavu, gdje je veći srednji umetak (duljina 3,7 cm) bio na opisani način izoliran od šupljih magneta desno i lijevo i s njima čvrsto spojen. Potrebno je naglasiti, da je kod ovih mjerenja spoj od površine u ekvatoru do rotacijone osovine magneta išao kroz tijelo srednjeg umetka do njegovog središta, a odavle izoliranom aksijalnom žicom do osovine. Otkloni  $U$  iz ovih mjerenja prikazani su u sl. 23. za položaj suprotnih polova, i to krivuljom  $A'$  za azimut  $90^\circ$ , a krivuljom  $B'$  za azimut nula. Za položaj istoimenih polova imamo ih u slici 24., gdje je  $A'$  za azimut  $90^\circ$ , a  $B'$  za azimut nula.

Pravci  $A, B, A', B'$  za puni i za složeni magnet na objema slikama 23. i 24. povučeni su tako, da je interpolacija među dobivenim točkama jednog niza mjerenja čim bolja. Treba onda smatrati dosta značajnom činjenicu, da su na objema slikama parovi pravaca  $A, A'$  i  $B, B'$ , koji odgovaraju istom položaju polova i istom azimutu kod punog magneta i kod složenog magneta više-manje međusobno paralelni. Utjecaj rasipanja vrijednosti na paralelizam je neznatan. Razlike u smjeru pravaca iz različitih nizova mjerenja kod istog azimuta, a koje dolaze od rasipanja vrijednosti, nijesu nikada tolike, da bi približni paralelizam dovele u sumnju. Važno je dakako s gledišta međusobne usporedljivosti nizova mjerenja, da daljine između kobaltnog magneta i polnih nastavaka

elektromagneta budu u svim mjerenjima iste, te da su i magnet i elektromagnet tako učvršćeni, da ostaju nepomični i kod jakosti struje 7 A u uzvojnici elektromagneta. Taj je pak uslov u svim mjerenjima bio ispunjen do na 0,1 mm.

Očito je prema svemu, da su porast unipolarne indukcije  $U'$  i  $U$  u položaju suprotnih polova, kao i njihovo opadanje u položaju istoimenih polova, samo prividni. U stvari u jednom i u drugom položaju polova prolazi kroz galvanometar i jedan dio vrtložnih struja, koje u magnetu izaziva nesimetrija vlastitog magnetskog toka uslijed superpozicije stranog magnetskog toka. Preglednije je za prvu približnost, ako kod toga strani magnetski tok promatramo zasebno, jer za njega je onda magnet kvalitativno Faradayevo ploča. Onda vrtložne struje u ekvatorijalnoj zoni kod azimuta nula imaju u položaju suprotnih polova isti smjer kao struja unipolarne indukcije, a u položaju istoimenih polova one imaju smjer protivan ovoj. Iz opisa složenog magneta u izoliranom stanju i iz položaja polnih nastavaka prema njemu (sl. 22.) izlazi, da je u njemu područje vrtložnih struja izolacijom između šupljih magneta i srednjeg umetka tako presječeno, da kod ovih mjerenja sudjeluju samo vrtložne struje, koje nastaju u srednjem umetku. Prema punom magnetu napose se ističe spomenuta razlika, da je kod složenog magneta unutrašnji spoj s galvanometrom oživotvoren samo kroz vijak u geometrijskom središtu srednjeg umetka. Odatle onda izlazi neposredno razlog približnom paralelizmu spomenutih parova pravaca kod punog magneta s onima kod složenog magneta: razlog stoji u tome, što u jednom i u drugom slučaju strmine pravaca uvjetuju vrtložne struje, koje nastaju u području *ekvatorijalne zone*.

S tim se posve slaže činjenica, da je odstupanje od paralelizma znatno veće kod položaja istoimenih polova nego kod položaja suprotnih polova. U jednom i drugom položaju jedan znatan dio magnetskog toka iz polnih nastavaka elektromagneta prolazi kroz kobaltni magnet i u smjeru od polnog nastavka prema susjednom polu magneta. Već promatranje raspodjele silnica upućuje na to, da će taj dio magnetskog toka biti znatno veći kod položaja istoimenih polova nego kod položaja suprotnih polova; jer se u prvom slučaju smjer jače komponente tog dijela stranog magnetskog toka u magnetu u području od polnog nastavka do susjednog pola magneta podudara sa smjerom njegovog vlastitog



magnetskog toka. U položaju suprotnih polova prilike stoje obrnuto. Napose upućuje na takvu raspodjelu stranog magnetskog toka kroz kobaltni magnet u položaju istoimenih polova promatranje krivulja 3 i III u slici 22., i to njihovih lijevih grana do apscise — 4, koje su prema sredini oko ekvatora o razmjerno uzdignute. Odatle pak slijedi, da u punom magnetu sudjeluju u otklonu galvanometra i vrtložne struje iz tih njegovih pobočnih područja, i to u jačem iznosu kod položaja istoimenih polova nego kod položaja suprotnih polova. Kod složenog magneta u izoliranom stanju ovi dijelovi vrtložnih struja otpadaju.

Da bi se ispitala opravdanost ovih zaključaka, izvedeni su isti nizovi mjerenja na složenom magnetu u izoliranom sastavu uz druge puteve struje. U jednoj skupini mjerenja magnet je bio doveden u stanje prije opisanog površinskog spoja, u drugoj skupini u stanje unutrašnjeg spoja (poglavlja 2. i 4.). Daljine između magneta i polnih nastavaka elektromagneta bile su jednake onima iz dosadašnjih mjerenja s mogućom pogreškom od najviše 0,1 mm.

Krivulje C i D u sl. 23. prikazuju otklone  $U$  svedene na  $\Phi_m$  za površinski spoj u položaju suprotnih polova; C je niz mjerenja u azimutu  $90^\circ$ , a D je niz mjerenja u azimutu nula. Dakle se i u površinskom spoju dobivaju pravci, ali je njihov nagib mnogo manji. Osim toga pada u oči i posve drugi oblik preloma kod  $\Phi_{e,m} = 12 \cdot 10^3$  maksvela, kao i ta pojedinost, da je nagib dijela pravca za  $\Phi_{e,m} > 13 \cdot 10^3$  maksvela manji nego u prvom dijelu, t. j. obrnuto nego li je slučaj kod radijalno-aksijalnog spoja. Naravno, i u ovim nizovima mjerenja mjereno je i magnetski tok  $\Phi_m$  u površinskom spoju, pa bi se na prvi mah moglo činiti, da bi razlog ovim promjenama mogla biti blizina neužbuđenog elektromagneta, koja bi naročito u azimutu nula mogla imati odlučnog utjecaja na vrijednosti  $\Phi_m$ , a tim i na rezultat svođenja opaženih otklona  $U'$  na prvobitni magnetski tok. Krivulja 4 u slici 18. prikazuje krivulju magnetskog toka, mjenog unipolarnom indukcijom kroz površinu u azimutu nula, koja pripada nizu mjerenja prikazanom krivuljom D u slici 23. Dakle su razlike premalene, a da bi se njima dala protumačiti razlika u nagibu pravca D prema pravcu B' u slici 23. Upotrebe li se za svođenje otklona  $U'$  na  $\Phi_m$  iz niza D vrijednosti  $\Phi_m$  iz niza B', koje su prikazane krivuljom 3 u slici 18., postizava se samo neznatno povećanje strmine pravca D. Napokon u pogledu dijela pravca D za  $\Phi_{e,m} > 13 \cdot 10^3$  maksvela,

vidimo iz odgovarajućeg dijela krivulje 4. u slici 18., da smanjenoj strmini porasta nije razlog u jakom smanjenju strmine opadanja vrijednosti  $\Phi_m$  mjerenih kroz površinu, nego mu je razlog u istinskom opadanju porasta izravno izmjerenih otklona  $U'$  u površinskom spoju.

Pravci  $C$  i  $D$  u slici 24. pripadaju površinskom spoju u položaju istoimenih polova, i to  $C$  je za azimut  $90^\circ$ , a  $D$  je za azimut nula. Ovdje razlike prema ekvatorijalno-aksijalnom spoju za oba azimuta samo malo prelaze granice rasipanja vrijednosti.

Napokon za unutrašnji spoj u položaju suprotnih polova (sl. 23.) skoro iščezavaju razlike između azimuta  $90^\circ$  (pravac  $E$ ) i azimuta nula (pravac  $F$ ), a smjer pravaca sasvim se je primaknuo smjeru pravaca za ekvatorijalno-aksijalni spoj kod azimuta  $90^\circ$ . — U položaju istoimenih polova uz unutrašnji spoj snimljen je samo niz mjerenja kod azimuta nula (slika 24., pravac  $F$ ). Nalazimo mnogo manji pad nego kod pravca  $B'$ , ali se je pravac ujedno bolje približio paralelizmu s pravcem  $B$  za puni magnet.

U površinskom i u unutrašnjem spoju dolaze do jačeg utjecaja i vrtložne struje, koje nastaju u susjednom površinskom sloju kobaltnog magneta uz same polne nastavke elektromagneta. U unutrašnjem spoju svakako će prevladivati vrtložne struje, koje nastaju u područjima šupljeg magneta prema polovima. Srednji umetak složenog magneta i ekvatorijalno područje punog magneta vladaju se prema elektromagnetu kao F a r a d a y e v a ploča s jedinom razlikom u tome, da su ovdje staze vrtložnih struja još i pod utjecajem gustog, skoro homogenog magnetskog toka samog magneta. Ta će okolnost imati upliva na oblik staza tih struja, pa se tom izobličenju, o kome je teško dobiti pregled, ima pripisati pretežni dio veće strmine pravaca za azimut  $90^\circ$  prema pravcima za azimut nula. Poblje zalaziti u ovo specijalno pitanje nije bilo potrebno, jer je ovdje od sporedne važnosti.

Iz krivulja o raspodjeli poremećenog magnetskog toka uzduž magneta u slici 22. vidimo, da je za ukupni iznos magnetskog toka jednog magneta mjerodavno magnetsko stanje u njegovoj ekvatorijalnoj zoni. Još je potrebno usporediti krajnje točke krivulja u slici 18., koje odgovaraju vrijednostima  $\Phi_m$  za  $i = 7$  A kao u tablici 7, s ovim krivuljama. U jednakim slučajevima iz slike 22. i slike 18. magnet je bio na jednak način izložen djelovanju elektromagneta uzbuđenog postepeno sve jačim strujama do maksimalno 7 A.



Uspoređivanjem ovih krivulja vidimo, da se magnetičko stanje u ekvatorijalnoj zoni na jednak način odražuje i u konačnom iznosu unipolarne indukcije  $U'' = \Phi_m$  između površine ekvatora i osi, u glavnom nezavisno i o tome, je li unipolarno inducirana struja vođena kroz cijeli magnet, kako je to slučaj kod punog magneta, ili je vođena jednim određenim putem, kakve možemo birati kod složenog magneta u izoliranom sastavu. Manji konačni pad unipolarne indukcije  $U''$  uz spoj suprotnih polova kvalitativno odgovara manjem padu magnetskog toka u ekvatoru kod istog spoja prema slici 22.; veći konačni pad unipolarne indukcije  $U''$  uz spoj istoimenih polova kvalitativno odgovara većem padu magnetskog toka u ekvatoru kod istog spoja. Očito, prvo stoji u vezi s drugim kao posljedica s uzrokom.<sup>379</sup>

Odavle se ipak ne mogu izvoditi nikakvi zaključci u tom smislu, kao da bi ekvatorijalnoj zoni u pogledu unipolarne inducirane elektromotorne sile pripadala kakva prednost pred bilo kojim presjekom, koji ide od osi kroz ekvator magneta. Međutim ovi rezultati opravdavaju i sa svoje strane obrnuti zaključak, da se površini magneta ne može pripisati nikakva bitna uloga za induciranje elektromotorne sile.<sup>380</sup>

Nadodati je još ovo. Prelazom od elektromagneta s uskim razmakom krakova na sve to šire razmake krakova imamo postepeni prelaz na spomenute pokuse od Crampa i Norgrovea. Dok je kod ovdje opisanih pokusa u glavnom sama ekvatorijalna zona magneta, koji rotira, Faradayeva ploča za strani magnetski tok, kod spomenutih pisaca ta uloga pripada skoro cijelom magnetu. Raskinimo njihov postrani magnet u položaju suprotnih polova, pa oba komada razmičimo sve to dalje uz istodobno njihovo primicanje prema osi magneta, koji se vrti. Tim pokus od Crampa i Norgrovea postepeno prelazi u Weberov pokus. Elektromotorne sile vrtložnih struja dobivaju sve više radi-

<sup>379</sup> Naravno, unipolarna indukcija između ekvatora i osi je i u magnetu s poremećenom raspodjelom magnetskog toka nezavisna o putu kroz magnet. Na složenom magnetu u izoliranom sastavu, kod kojega je raspodjela magnetskog toka odgovarala krivulji III u sl. 22, unipolarna indukcija kroz srednji umetak bila je do na 0,7% jednaka unipolarnoj indukciji u površinskom spoju, nakon što je u oba slučaja elektromagnet uklonjen.

<sup>380</sup> Kao predstavnik takvih nazora može se uzeti i postupak, kojim Becker, l. c. <sup>281</sup>, na str. 335 izračunava induciranu elektromotornu silu (jednadžba 62 . 4). Međutim treba pripomenuti, da Becker taj postupak donosi samo kao uobičajeni propis za izračunavanje elektromotorne sile u smislu Maxwellove teorije.

jalni poredak, pa kad vanjski magneti dođu u os magneta, koji se vrti, imamo normalnu unipolarnu indukciju. Dakle imamo isti postepeni prelaz kao od F a r a d a y evih pokusa, kojima je on protumačio A r a g o oov rotacioni magnetizam, k njegovim pokusima o unipolarnoj indukciji.

### 9. Zaključak.

Kako se vidi iz povjesnog pregleda, shvaćanja o unipolarnoj indukciji prošla su u ovo 110 godina kroz stranputice, kakve nijesu neobične u razvoju nauke. Lutanja možemo jednim dijelom pripisati tome, što se je na osnovu loše postavljenih pretpostavki tražilo od unipolarne indukcije odgovor na pitanja, na koja ona ne može dati odgovora. Lutanjima je dosta doprinijela i okolnost, da se kasniji pisci često nijesu znali kod prosuđivanja radova svojih prethodnika uživjeti u njihov način gledanja. Površno ili pogrešno poznavanje ranijih eksperimentalnih rezultata također je pridonijelo svoje. Bilo je eksperimentalnih istraživanja, gdje je osjetljivost mjeraćih instrumenata bila premalena za elektromotorne sile dobivene slabim magnetima uz malene frekvencije vrtnje; kad su zbog toga izostali otkloni, izvođeni su odatle neopravdani zaključci. Prijepor o pitanju, da li silnice miruju ili rotiraju s magnetom, rodio se je iz previše realnog zamišljanja magnetskih silnica, bilo da se ove shvaća kao linije djelovanja sile ili kao indukcijone linije. Najapstraktnija teorija unipolarne indukcije, S z a r v a s s i e v a, počiva u svojoj polaznoj točki na pretpostavci, koja ne odgovara realnosti. Ako se naime uzme u obzir zavlačenje zraka kod rotacije magneta, onda se ova teorija u svojim osnovima ne slaže s H e r t z o v o m teorijom indukcije za tjelesa u gibanju, na kojoj je izgrađena, a koja opet počiva na hipotezi posvemašnjeg zavlačenja etera.

Proučavanje F a r a d a y evih istraživanja pokazuje, da je on unipolarnu indukciju na magnetu u vrtnji shvaćao samo kao poseban slučaj indukcije kod vrtnje vodiča u homogenom ili barem u aksijalno simetričnom magnetskom polju. S tog gledišta ona je u najširem smislu specijalan slučaj indukcije na F a r a d a y e v o j ili A r a g o o v o j ploči. Tako je na nju gledao i N o b i l i. Takvo shvaćanje, u kojem se posve apstrahira od unutrašnje strukture magneta, stoji u pogledu svih do sada poznatih pojava posve u



skladu s teorijom unipolarne indukcije, kako ju je razvio Lorentz na osnovu svoje teorije elektrona. Ako se dakle taj slijed misli, koji nalazimo kod Faradaya i kod Nobilia, dalje razvije, ima se magnet obzirom na eksperimentalno utvrđeno točno važenje jednadžbe (5) shvaćati kao prostor s velikom gustoćom magnetskog toka. Magnet u rotaciji je prema tome samo elektronski vodič, koji rotira kroz svoj vlastiti magnetski tok. Inducirana elektromotorna sila je onda posljedica djelovanja Lorentzove sile  $\frac{e}{c} [\mathbf{v} \mathbf{B}]$  na vodne elektrone. S ovim rezultatom ovakvog shvaćanja slažu se u konačnim crtama i najnovije teorije od Swanna i od Beckera. Razlike između ovih triju teorija mogle bi postojati samo u pogledu pojava višeg reda, kakvi su do sada kod unipolarne indukcije nepoznati.<sup>381</sup>

U pogledu pojedinosti treba u prvom redu istaknuti, da su rezultati elektrostatičkih mjerenja inducirane elektromotorne sile i ovdje pokazali na dva načina posvemašnje slaganje jednadžbe (5) s eksperimentom. S predodžbom magneta u vrtnji kao elektronskog vodiča, koji se vrti kroz svoj magnetski tok, spojena je parabolička raspodjela inducirane elektromotorne sile uzduž ekvatorijalnog polumjera prema jednadžbi (6), ako se zanemari laki porast gustoće magnetskog toka od osi prema površini. Mjerenja u procijepima magneta, paralelnim s ravninom ekvatora, pokazuju, da se radijalna raspodjela inducirane elektromotorne sile zaista približava paraboličkoj raspodjeli s onakvom točnošću, kakvu možemo pretpostaviti za homogenost gustoće magnetskog toka  $\mathbf{B}_n$  u dotičnoj udaljenosti od ekvatorijalne ravnine, te da odstupanja od paraboličke raspodjele u redu veličine odgovaraju odstupanjima od homogenosti gustoće magnetskog toka. — Pomoću diferencijalne krivulje za krivulju radijalne raspodjele inducirane elektromotorne sile na ploči u ravnini ekvatora magneta da se odrediti radijalna raspodjela gustoće magnetskog toka u vanjskom dijelu ekvatorijalne ravnine. To se isto da provesti za makar koju ravninu paralelnu s ekvatorom za komponentu  $\mathbf{B}_n$  gustoće magnetskog toka, paralelnu s rotacijom osi.

<sup>381</sup> Prema cijelom povjesnom razvoju čini mi se onda, da nema mnogo opravdanja primjedba, koju čini Emde (l. c. <sup>267</sup>, S. 479): »Ob Faraday geahnt hat, wieviel Kopfzerbrechen sein einfacher Versuch spätern Geschlechtern noch verursachen würde?« Na Faradaya u nema krivnje za to.

Pokusi na složenom magnetu u izoliranom stanju pokazuju, da se površini magneta ne može pripisati nikakva istaknuta uloga za unipolarnu indukciju. Na to upućuje i B l o n d e l o v pokus izveden na magnetu u vrtnji. Konačno na to upućuju djelomično i mjerenja o uplivu stranog magnetskog toka na unipolarnu indukciju na složenom magnetu u izoliranom sastavu u poredbi s takvim mjerenjima izvedenim na punom magnetu. Naprotiv površina je ekvivalentna s bilo kojom čunjastom plohom s bilo kako zakrivljenom izvodnicom, koja ploha ima vrh u osi magneta, a prolazi kroz ekvator. Jedna od tih ploha je i ekvatorijalni presjek magneta.

Rezultati B l o n d e l o v a pokusa, izvedenog na spomenuti način, potvrđuju s velikom točnošću ispravnost B l o n d e l o v a zaključka, da nema elektromotorne sile, koja bi se inducirala samo promjenom broja uzvoja, koji obuhvaćaju vremenom konstantni magnetski tok.

Rezultati ovako izvedenog B l o n d e l o v a pokusa pokazuju i to, da sklizni kontakti imaju samo značaj eksperimentalne praktičnosti, a da im ni za unipolarnu indukciju ni za unipolarnu rotaciju ne pripada nikakva bitna uloga.

Predznak inducirane elektromotorne sile treba definirati po njezinom smjeru prema ekvatoru magneta. Onda se u magnetu i u vanjskom vodiču kod vrtnje istim smjerom induciraju elektromotorne sile istog smjera.

Pokusi sa složenim magnetom u izoliranom sastavu i u vodljivom sastavu pokazali su, da je inducirana elektromotorna sila posve nezavisna o tome, jesu li glavna područja električkih plošnih vrtloga u teorijama S z a r v a s s i a i J a u m a n n a vodljivo spojena s galvanometarskim krugom ili su od njega izolirana. Čini se, da bi u smislu ovih teorija trebao biti glavni uvjet, da ta područja leže u galvanometarskom krugu. Ne bi bilo indukcije, ako ta područja leže postrance od galvanometarskog kruga, kako je to u B l o n d e l o v u pokusu; ali u tom slučaju je ni inače ne može biti.

Pod uplivom stranog magnetskog toka, koji djeluje na ekvatorijalno područje magneta u vrtnji, povećavaju se otkloni galvanometra, ako strani magnetski tok u tom području magneta ima isti smjer kao vlastiti magnetski tok  $\Phi_m$  u magnetu, a umanjuju se otkloni, ako je smjer stranog magnetskog toka u tom području suprotan smjeru magnetskog toka  $\Phi_m$ . U jednom i u drugom slučaju opada magnetski tok  $\Phi_m$  magneta. Ako se ovi otkloni svedu na početnu



vrijednost  $\Phi_{m_0}$ , poredavaju se tako dobiveni otkloni, u zavisnosti o jakosti stranog magnetskog toka, na slomljenim pravcima, kojih je nagib različit za različite azimute, koje doticaljka u ekvatoru čini s ravninom elektromagneta, iz kojega potječe strani magnetski tok. Takvi pravci dobiveni na punom magnetu teku od prilike paralelno s pravcima dobivenim na složenom magnetu u izoliranom sastavu i u ekvatorijalno-aksijalnom spoju uz isti azimut i uz isti položaj polova elektromagneta prema polovima magneta. Uzrok ovih promjena su vrtložne struje. Mjesto preloma pravaca dovodi se u vezu sa skokovima u krivulji histereze u unutrašnjim slojevima magnetnog čelika i s povećanjem permeabilnosti. —

Ne smije se mimoći poteškoća, koju čini tumačenje jednakosti inducirane elektromotorne sile u spoju radijalne žice na složenom magnetu u izoliranom ili u vodljivom sastavu s induciranim elektromotornim silama kod spojeva, u kojima sudjeluje cijela unutrašnjost magneta ili ma koja konička ploha od osi do ekvatora (tablica 1.). S gledišta stare hipoteze o rotaciji silnica ovaj je rezultat doduše posve razumljiv, jer po njoj u svim slučajevima indukcija kod rotacije magneta nastaje u vanjskom nepomičnom vodiču. Međutim rezultati *Lecherova* (*»experimentum crucis«*) i *Swannova* pokusa konačno su uklonili ovu hipotezu. Ako radijalnu rupicu, kroz koju izolirano prolazi radijalna žica  $r$ , shvatimo približno kao plitki, a široki bubanj, što po *Maxwellu* posve odgovara,<sup>382</sup> onda bi poteškoća otpadala, jer u takvom bubnju vlada nepromijenjena gustoća  $\mathfrak{B}_n$  magnetskog toka. Radi se o tome, bili se u sitnoj *Farrada* y evoj ispitnoj žici, koja bi se kroz tu rupicu pomicala okomito na magnetski tok, inducirala jednaka elektromotorna sila kao kad bismo tu žicu istom brzinom i u istom položaju pomicali kroz sam magnet. Sudeći po najnovijim *Wall* ovim pokusima,<sup>383</sup> smije se u to sumnjati, premda je os-rupice okomita na magnetski tok. Međutim iste rezultate kao s radijalnom žicom u radijalnoj rupici kao da imamo u nekim *Farrada* y evim pokusima iz g. 1851., gdje su oba njegova magneta u rotacionom aparatu bila rastavljena uzdužnom šupljinom širine  $1/15$  palca, pa je on ipak dobivao jednake otklone galvanometra, bilo da je unutrašnji spoj od ekvatorijalnog prstena do galvanometarske spojke proveo izoliranom žicom kroz ekvatorijalnu ravninu i aksijalnom žicom kroz

<sup>382</sup> *Maxwell*, l. c. 330, vol. II, § 400, p. 25 (napomena).

<sup>383</sup> *T. F. Wall*, *Nature* 142, 1039, 1938; 143, 331, 1939.

uzdužnu os šupljine, ili je za taj dio spoja upotrebio bilo polovinu jednog magneta bilo njegov ekvatorijalni dio od kraja aksijalne žice do prstena.<sup>384, 385</sup> Iz jednakosti rezultata čini mi se opravdanim, da pokuse s radijalnom žicom u radijalnoj rupici treba dovesti u vezu s ovim F a r a d a y evim pokusima. Međutim kod F a r a d a y evih pokusa u prvom načinu spajanja predstavljala je uzdužna šupljina među magnetima i po M a x w e l l o v u shvaćanju prostor siromašan na magnetskom toku, a u tom prostoru se gibala radijalna žica.

Čini mi se, da ove pokuse treba tumačiti na slijedeći način. Kod rotacije magneta promjena strukture prostora, koja odgovara punom magnetskom toku, prelazi na jednoj granici šupljine uvijek na nove elemente prostora, a na drugoj granici stari elementi prostora izmiču iz te strukture. Zbog toga se u toj šupljini širi elektromagnetski val. Magnetički dio tog vala superponira se u indukcijom djelovanju na stalni ostatak magnetskog toka, koji vlada u toj šupljini, pa je rezultirajuća elektromotorna sila ista, kao da u šupljini vlada nepromijenjeni magnetski tok s gustoćom  $\mathcal{B}_n$  kao u neposrednoj okolici unutar magneta. To jednako vrijedi, bilo da pođemo s gledišta hipoteze rezanja silnica ili s gledišta povećavanja magnetskog toka uslijed povećavanja plohe opisane rotacijom. Ovim se onda obuhvaćaju u ovu skupinu pojava i P l ü c k e r o v i pokusi s jednim ili više ekscentrički namještenih magneta.

Radnja je izrađena u fizikalnom zavodu filozofskog fakulteta sveučilišta u Zagrebu. Predstojnik zavoda gosp. prof. Dr. Stanko Hondl stavio mi je najpripravnije na raspolaganje zavodska sredstva i omogućio je ovo istraživanje nabavom potrebnog materijala i dijela literature. Čast mi je i na ovom mjestu izraziti g. Prof. Dr. H o n d l u moju iskrenu zahvalnost.

U Z a g r e b u, koncem siječnja 1941.

<sup>384</sup> Faraday's Diary, §§ 11377—11378, 11380, 11381—11383 11587—11589, 11591, 11592; Exp. Res., vol. III, §§ 3096, 3097, 3098, 3116, 3118, 3119.

<sup>385</sup> Faradayevi magneti imali su povrhu toga znatno različite jakosti (Diary, vol. VI, §§ 11711, 11713, 11716—11719, 11721), a čini se, da nijesu bili ni simetrično magnetizirani (ibid., §§ 11718—11719). Iz gore navedenih mjesta u Dnevniku ne vidi se, je li F a r a d a y oba vodljivo spajao s aksijalnom žicom ili samo jedan, i koji: jači ili slabiji.



*Dodatak kod korekture.* Koncem g. 1941. izvedeni su pokusi o posljednjoj točki s nanovo složenim magnetom, pri čemu je srednji umetak  $B$  bio zamijenjen drugim srednjim umetkom, koji je imao u blizini ekvatora radijalnu rupu promjera 10 mm. Mjerenje srednje gustoće magnetskog toka u ovoj rupi pokazalo je, da ona iznosi 2,9% srednje gustoće magnetskog toka u presjeku magneta položenom kroz os rupe paralelno s ekvatorom. Sa svim tim bila je elektromotorna sila inducirana kod vrtnje magneta u spoju radijalne žice provedene kroz os radijalne rupe s velikom točnošću jednaka elektromotornoj sili induciranoj normalnom unipolarnom indukcijom u spoju kroz magnet u istom paralelnom presjeku kod iste frekvencije vrtnje. Isto tako je okretni momenat unipolarne rotacije sa strujom kroz radijalnu žicu bio jednak okretnom momentu normalne unipolarne rotacije sa strujom kroz magnet u istom paralelnom presjeku. Kratak prikaz ovih novih istraživanja izaći će u »Nastavnom Vjesniku«.\*

### Kazalo imena.

- |                                     |                                   |
|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Abraham 14, 19, 31, 47, 48, 53,     | Cahen 43, 80                      |
| 63—65, 66, 67, 78, 110, 113, 114,   | Celeri 3, 21, 80, 86, 129         |
| 128                                 | Chabot 2, 42—43, 74, 80           |
| Adams 84                            | Chwolson 80, 134                  |
| Ampère 11, 15, 16, 21, 22, 42, 55,  | Cooper 80                         |
| 60                                  | Cotton 5, 80                      |
| Antinori 6, 9, 11, 12               | Cramp 29, 31, 36, 44, 59, 60, 62, |
| Appleyard 3, 78                     | 80, 101, 129, 130, 131, 137, 154  |
| Arago (ploča) 4, 5, 9, 69, 155      | Cullwick 59, 60, 62, 80           |
|                                     | Czermak 1, 19, 26, 29, 43, 87     |
| Baily 59                            |                                   |
| Barnett 1, 14, 28, 45, 46, 48—49,   | Diesselhorst 15, 66, 70, 81       |
| 50—52, 53, 54, 56, 58, 71, 79       | Drysdale 60, 81                   |
| Baumgardt 48, 49, 59, 79            | Dunton 81                         |
| Becker 62, 63, 70, 71, 79, 154, 156 | Düsing 45, 81                     |
| Beer 1, 13, 17, 21—22, 24, 74, 99   |                                   |
| Blondel 1, 59, 60, 61, 79, 127—135, | Ebert 45, 81                      |
| 157                                 | Edlund 1, 14, 22—24, 25—27, 29,   |
| Blondlot (pokusi) 48, 49, 51, 52    | 74, 75, 99, 101                   |
| Bonetto 71                          | Einstein 49, 71                   |
| Bragg W. 12, 80                     | Emde 43, 66, 71, 81, 156          |
| Budde 3, 5, 10, 24, 27, 66, 74, 80  | Exner 1, 19, 26, 29, 43, 87       |

\* M. Katalinić, Nastavni Vjesnik 50, 425, 1942.

- Faraday 1, 2, 3—9, 10, 11, 12, 13,  
14, 16, 17—19, 20, 22, 23, 24, 25,  
26, 27, 28—39, 42, 46, 49, 50, 54,  
57, 59, 60, 63, 68, 69, 70, 71, 73,  
75, 87, 88, 89, 99, 100, 104, 107,  
112, 128, 135, 136, 142, 151, 153,  
154, 155, 156, 158, 159
- Fechner 17, 73, 120
- Fehrle 1, 14, 28, 49, 52—53, 54,  
58, 81
- Feldmann 2, 4, 81
- Felici 1, 3, 17, 20—21, 75, 89, 99,  
106
- Finlay 80
- Fischer 81, 88
- Fleischmann L. 41, 59, 62, 75,  
81
- Föppl 1, 14, 19, 21, 31, 46, 47, 60,  
63, 65, 75, 78, 113, 114
- Gans 45, 82
- Gay-Lussac (pismo) 4, 6, 7, 12
- Graetz 52, 82
- Grottrian 1, 15, 16, 27, 41, 44, 82,  
89, 90, 106, 120
- Hagenbach 24, 41, 42, 82, 111
- Helmholtz 21, 22, 23, 60
- Hertz 39, 41, 45, 46, 47, 48, 49, 51,  
63, 65, 66, 114, 127, 155
- Himstedt 14, 75
- Hollingworth 82
- Hoppe 1, 27, 29, 33, 36, 40, 41, 43,  
44—45, 59, 75, 82
- Howe 29, 59, 62, 80
- Huth 41, 82
- Jaumann 1, 48, 63, 66—67, 75,  
82, 110, 157
- Jochmann 76
- Kalischer 2, 31, 73, 135, 136
- Kaufmann 45
- Kennard 1, 15, 28, 49, 50—52,  
53—54, 56, 58, 71, 83
- Kimball 58, 83
- Rad hrv. akad. 274
- Koch 24, 76, 101
- König 24, 41, 42, 76, 83
- Lawrence 28, 49, 54, 56—57, 83,  
125, 126
- Lecher 1, 4, 17, 39—40, 41, 42, 43,  
62, 76, 83, 137, 158
- Ledward 59, 80
- Lenz 1, 15, 45, 73
- Lodge 39, 76
- Lorberg 24, 26, 41, 42, 76
- Lorenz 76, 96
- Lorentz 1, 14, 15, 26, 31, 32, 43,  
46, 47—48, 49, 50, 51, 53, 54, 55,  
58, 62, 63—65, 66, 67, 68, 69, 70,  
71, 72, 83, 84, 127, 156
- Matteucci 2, 16, 77
- Maxwell 12, 21, 31, 41, 43, 45, 54,  
55, 58, 59, 60, 62, 63, 64, 67, 77,  
113, 114, 132, 154, 158
- Mie 32, 62, 63, 67—68, 83, 84, 130,  
134
- Neumann C. 21, 22—23, 77
- Nichols 71
- Nobili 1, 6, 9—13, 14, 15, 22, 25,  
26, 49, 60, 69, 71, 73, 88, 89, 155,  
156
- Noeggerath 2, 3, 4
- Norgrove 29, 36, 44, 60, 62, 80,  
101, 129, 130, 131, 137
- Ollivier 14
- Olshausen 21, 24, 41, 84
- Page 15, 84, 87
- Pegram 3, 49, 53, 54, 58, 84
- Pietenpol 84
- Plücker 1, 2, 3, 13, 16, 19—20,  
22, 23, 24, 25, 27, 42, 58, 77, 99,  
101, 112, 136, 159
- Poggendorff 2, 15, 19, 73, 136
- Pohl R. W. 32, 134
- Poincaré 1, 21, 42, 43, 45, 47, 48,  
53, 60, 61, 62, 77, 84



- Poirson 5, 71, 84, 137  
Preston 1, 17, 27—28, 29, 36, 37,  
39, 46, 50, 57, 63, 77, 114  
Raveau 1, 43, 77, 78  
Rawcliffe 80  
Ray 5, 39, 58, 71, 84  
Reinganum 83  
Riecke 2, 16, 24, 78  
Ritchie 15, 73  
Robertson 60, 129  
Rognley 54, 56, 57, 84  
Le Roux 2, 14, 60, 78  
Schlomka 84  
Slepian 63, 84  
Sommerfeld 83  
Stefanini 58—59, 85  
Sutton 22, 114  
Swann 1, 28, 44, 49, 54—58, 62,  
72, 85, 121, 124, 125, 126, 127,  
156, 158  
Szarvassi 1, 21, 47, 63, 65—66,  
67, 85, 110, 155, 157  
Tate 1, 49, 53, 54, 56, 58, 85  
Thomson J. J. 59  
Tischendörfer 4, 81  
Trettin 86  
Turnbull 60  
Ugrinoff 86  
Valentiner 3, 21, 43, 44, 45, 48,  
54, 62, 66, 82, 83, 86  
Vollgraff 41, 47, 49, 70, 86  
Volterra 10, 86  
de Waha 42, 86  
Wand 23—24, 78  
Wall 158  
Wang 71, 83  
Weber R. H. 45, 46, 48, 82, 86, 87  
Weber W. 1, 2, 13, 16, 18, 22—24,  
27, 73, 78, 99, 136, 137, 154  
Wiedemann 2, 13, 14, 20, 78, 99,  
100  
Wien W. 1, 46, 48, 59, 78  
Wilcken 60, 87  
Wilson (pokus) 14, 48, 49, 50, 51,  
62, 67, 70, 73  
Winkelmann 78  
Zeleny 15, 87  
Zöllner 21, 78  
Zorn 5, 87