

## E L E K T R O T E C H N I C Z N Y

Warszawa, (Czackiego 5) 15 Grudnia 1931 r

## INDUKCJA ELEKTROMAGNETYCZNA FARADAYA.

Prof. Dr. Inż. Stanisław Fryze.

Odczyt wygłoszony na Walnem Zgromadzeniu SEP we Lwowie 14 maja 1931 r.

„Zamienić magnetyzm na elektryczność” - oto pierwsza notatka z roku 1822, jaką znajdujemy w dzienniku laboratoryjnym Faradaya, odnośnie do największego z jego odkryć - INDUKCJI ELEKTROMAGNETYCZNEJ.

W roku 1820 duński fizyk Oersted odkrył działania prądu elektrycznego na igiełkę magnetyczną i w tym samym roku Arago zbudował pierwszy elektromagnes. Sądono wówczas, że udało się zamienić elektryczność na magnetyzm, a bystry umysł Faradaya od razu rodzi ideę zamiany odwrotnej - magnetyzmu na elektryczność.

Wiele lat pracy poświęca Faraday zrealizowaniu tej myśli, w poszukiwaniu zjawiska, które, jak wiemy, nie mogło się ujawnić. Poszukiwali za nim i inni, jak Fresnel, Ampère, Arago i t.d., oczywiście również bezskutecznie. Lecz gdy inni, zniechęceni niepowodzeniem, porzucili nie wdzięczną ideę, Faraday trwał przy niej uparcie, wysilając się na coraz nowe doświadczenia i pomysły eksperymentatorskie. Wszechstronny umysł Faradaya zajmują oczywiście i inne problemy naukowe. W dziesięcioleciu 1820 - 1830, poprzedzającym odkrycie indukcji, Faraday ogłasza mnóstwo prac z dziedziny chemii i fizyki. Gdy tylko jednak kończy jakąś serję doświadczeń - czy to z parami i gazami, czy nad optycznymi własnościami szkieł, wraca natychmiast do tej jednej, porzuconej już przez wszystkich idei: „zamienić magnetyzm na elektryczność”.

Nieudane doświadczenia nie zrażały Faradaya i mimo negatywnych wyników miały tę korzyść, że zacieśniały coraz więcej teren badań. Jak poszukiwacz przeczuwanego skarbu, zazdrośnie ukrytego przez naturę, tak Faraday kruszy skały trudności, bada cierpliwie najdrobniejsze grudki ubocznych zjawisk, zyskując w wielu latach tę tylko pewność, gdzie skarbu napewno niema. Najpiękniejszy wiek męski od 30 do 40 roku życia upływa Faradayowi w tych zmaganiach z przyrodą, którą w końcu, w pamiętnym roku 1831 zmusza do odsłonięcia tajemnicy. Genialnemu badaczowi wystarczyły drobne drgnienia igiełki magnetycznej, widoczne przy załączaniu i wyłączaniu prądu w układzie dwu cewek, skojarzonych magnetycznie, aby W KILKA TYGODNI PO ZAUBAŻENIU TEGO NIKŁEGO ZJAWISKA, BYŁ GOTÓW Z SERIĄ BADAŃ, STANOWIĄCYCH DZIŚ FUNDAMENT, NA KTÓRYM WSPIERA SIĘ POTĘŻNY I PRZEPIĘKNY GMACH FARADAYOWSKIEJ INDUKCJI.



Odkrycie to, które kto wie czy nie po wsze czasy pozostanie największem w dziejach elektrotechniki, zawdzięczamy tej niezwyklej właściwości umysłu Faradaya, że łączył on olbrzymią siłę z doskonałą elastycznością. Jak świder z najszlachetniejszej stali, wdrażał się wnikliwy umysł Faradaya we wnętrze pełnej tajemnic przyrody, przystosowując się po drodze do wszelkich nierówności i odchylen, bez nadwierżania swych ostrych krawędzi. Małe odchylenia igiełki magnetycznej, które dla innych badaczy naukowych mogły stanowić nic nie znaczące zjawisko uboczne, nie tylko zwracają natychmiast uwagę Faradaya, lecz także skierowują jego wnikliwy umysł na nowy tor myśli. Badacz, który przez 10 lat był głęboko przekonany o słuszności swych pierwotnych przypuszczeń, potrafił w ciągu mniej więcej tyłu tygodni nie tylko przerzucić się w zgoła odmienny pogląd, lecz ponadto jeszcze obmyślić i wykonać całą serję doświadczeń, których i dziś jeszcze, mimo całej naszej wiedzy o indukcji, nie ułożylibyśmy, przy środkach jakimi dysponował Faraday, lepiej, niż on to sam zrobił. Zapoznajmy się z temi doświadczeniami w takiej kolejności, w jakiej on je wyłożył w swej drukowanej rozprawie. Kolejność ta odbiega od chronologicznego porządku doświadczeń, wykonanych przy pierwszych badaniach.

Do swych doświadczeń, opisanych w I serji badań, użył Faraday dwóch drutów, zwiniętych śrubowo na wałku drewnianym. Aby zwoje każdej cewki ze sobą się nie stykały, przedzielił je cienkim sznurkiem, zaś jedną warstwę drutu izolował od następnej przy pomocy płótna introligatorskiego „Calico”. Końce jednej z dwu w ten sposób uzyskanych cewek połączył Faraday z baterją Volty o 10 parach płyt, końce drugiej - z galwanometrem igiełkowym. Podczas przepływu prądu przez cewkę I igiełka galwanometru, załączonego w cewce II, stała nieruchomo. Także przy załączaniu i wyłączaniu prądu nie zauważył Faraday żadnego wychylenia. Dopiero przy powiększeniu baterji z 10 ogniw Volty do 100 dało się zauważyć zarówno przy załączaniu jak i przy wyłączaniu lekkie drgnienie igiełki. Faraday spostrzega, że drobne te ruchy mają przeciwne kierunki i przypisuje je działaniu prądów, wytwarzanych w cewce II-giej. Ponieważ zaś prądy te przypominały raczej wyładowania butelki lejdejskiej, niż „prawdziwy”, t.j. pochodzący z baterji, prąd elektryczny, przeto natychmiast wykonywa serję doświadczeń, zmierzających do ustalenia ich właściwości. Nader słaby prąd, indukowany w cewce z galwanometrem (II), nie dawał oczywiście działań fizjologicznych (Faraday stwierdził to, dotykając językiem obu końców cewki wtórnej), nie rozgrzewał drutów, przez które przepływał, nie wzbudzał iskier, nie działał chemicznie.<sup>x)</sup> Jednak udało się Faradayowi namagnesować tym prądem igiełki stalowe, znajdujące się w rurce szklanej, owiniętej drutem, połączonym z obwodem cewki wtórnej.

x) Oczywiście brak tych działań tłumaczy się nikłością prądów indukowanych w pierwszych doświadczeniach, oraz brakiem odpowiedniej aparatury badawczej.



Faraday stwierdził też, że ow prąd indukowany posiada zdolność przechodzenia przez ciecze, bo gdy włączył w obwód galwanometru dwie płytki miedziane, zanurzone w roztworze wodnym soli kuchennej, to igielka tak samo się wychylała, jak w przypadku bezpośredniego połączenia.

Aby się przekonać, czy elektryczność statyczna także potrafi indukować prąd w uzwojeniu wtórnem, Faraday załączył w miejsce baterji Volty butelkę lejdejską. Zamiast galwanometru umieścił rurkę szklaną z igłą stalową, owiniętą drutem. Po wyładowaniu butelki w obwodzie pierwotnym igła uległa namagnesowaniu. Faraday odnosi się jednak do tego doświadczenia z wielką rezerwą. Nie ma zaufania do izolacji sporządzonej z płótna introligatorskiego i sznurka, przypuszcza, że namagnesowanie nastąpiło skutkiem przepływu elektryczności z butelki lejdejskiej wprost do obwodu wtórnego, poprzez izolację między uzwojeniem pierwotnem i wtórnem. Wprawdzie jest pewny, że przepływ elektryczności „statycznej” powinien wywołać takie same działanie indukcyjne, jak przepływ elektryczności galwanicznej, wykonuje jednak jeszcze cały szereg doświadczeń, aby uzyskać pewność w tym względzie.

Przy prymitywnych środkach, jakimi Faraday rozporządzał, nie można było stwierdzić dokładnie, czy prąd indukowany w cewce wtórnej zespołu dwu cewek jest jednakowy przy załączaniu i wyłączaniu prądu indukującego w cewce pierwotnej. „Na oko” odchylenie było jednakowe. Faradayowi to oczywiście nie wystarcza i natychmiast obmyśla sposób równie dowcipny jak prosty: Załącza w obwód wtórny rurkę szklaną, owiniętą drutem miedzianym, która zawiera igielki stalowe. Jeżeli indukcyjny prąd otwarcia jest co do wielkości równy indukcyjnemu prądowi zamknięcia, to po załączeniu i powrotnem wyłączeniu prądu w obwodzie pierwotnym nie powinny igielki w obwodzie wtórnym okazać własności magnetycznych. Gdyby jednak którykolwiek z tych prądów był większy, to musiałaby w igielkach pozostać różnica obu namagnesowań. Różnicę tę, przypuszczalnie znikomą, próbował Faraday zwiększyć przez wielokrotne powtórzenie zamknięcia i otwarcia prądu pierwotnego. Tak prymitywne urządzenie, umożliwiające zwiększenie czułości pomiaru prawie do dowolnych granic i wykazujące praktycznie brak magnetyzmu w igielkach nawet po bardzo dużej ilości załączeń i wyłączeń prądu w cewce pierwotnej, umożliwiło Faradayowi postawienie pierwszej tezy niewzruszonej po dziś dzień, że NABOJE ELEKTRYCZNE, INDUKOWANE W CEWCE WTÓRNEJ PRZY ZAŁĄCZENIU I WYŁĄCZENIU PRĄDU W CEWCE PIERWOTNEJ, SĄ JEDNAKOWE.

Co do kierunku prądów indukowanych stwierdził Faraday, że PRZY ZAMKNIĘCIU PRĄDU PIERWOTNEGO POWSTAWAŁ W CEWCE WTÓRNEJ PRĄD O KIERUNKU PRZECIWNYM DO PRĄDU INDUKUJĄCEGO; PRZY PRZERWANIU PRĄDU PIERWOTNEGO POWSTAWAŁ PRĄD WTÓRNY, SKIEROWANY ZGODNIE Z PRĄDEM INDUKUJĄCYM.



Temi wynikami jednak Faraday się nie zadowolili. Nie znał jeszcze zupełnie mechanizmu zjawiska i nie wiedział, czy nie należy przypadkiem przypisać powstawania prądów w obwodzie wtórnym jakiemuś szczególnemu działaniu, towarzyszącemu zamykaniu i otwieraniu stosu Volty. Dlatego odmienił nieco swoje pierwsze doświadczenie. Sporządził dwie szerokie deski i rozpiął na każdej z nich drut miedziany o długości kilku stóp w kształcie litery W. Końce jednego z tych drutów połączył z galwanometrem, końce drugiego załączył na bieguny baterji Volty. Jak długo obie deski były względem siebie w spoczynku, galwanometr nie dawał żadnego odchylenia. Gdy jednak Faraday zbliżył szybko obie deski do siebie, igiełka galwanometru odchyliła się. Oddalenie desek powodowało wychylenie igiełki w kierunku przeciwnym. Aby te drobne wychylenia zwiększyć, i przez to lepiej uwidocznic, użył Faraday dowcipnego sposobu: zbliżał i oddalał deski rytmicznie w takt wahań igiełki magnetycznej, czyli użył rezonansu mechanicznego, aby zmusić igiełkę swego mało precyzyjnego przyrządu do wielkich wychyleń.

W końcu pragnął się Faraday przekonać, czy istnieje niezależność między prądami Volty, a prądami powstałymi przez indukcję, t.j. czy w przewodniku, przez który przepływa prąd stały, może powstać prąd wskutek indukcji tak samo jak w przewodniku, w którym nie płynie żaden prąd. W tym celu załączył w obwód wtórny, składający się z cewki i galwanometru, mały stos Volty. Wskutek tego nastąpiło trwałe odchylenie igiełki galwanometru o kąt około  $30^{\circ}$ . W chwili gdy załączono cewkę pierwotną na bieguny wielkiej baterji, igiełka doznała chwilowego odchylenia i po kilku wahanjach wróciła dokładnie w to położenie, jakie zajmowała przed załączeniem prądu pierwotnego. Przerwanie obwodu pierwotnego powodowało chwilowe odchylenie igiełki w kierunku przeciwnym, niż poprzednio, poczem igiełka znów wróciła w dawne położenie.

To ostatnie doświadczenie rozprasza wątpliwości Faradaya co do superpozycji prądów indukcyjnych z prądami Volty. Zasadnicze dwa zjawiska indukcji elektromagnetycznej, t.j. **INDUKCJA PRZEZ ZMIANY PRĄDU I PRZEZ RUCH PRZEWODNIKA**, zostały odkryte, brak było tylko jeszcze ogólnej teorii, któraby tłumaczyła mechanizm tych zjawisk. Faraday przyjął na razie hipotezę, że obecność prądu stałego w przewodniku pierwotnym wprawia przewodnik wtórny w stan szczególny, który nazwał „ELEKTROTONICZNYM”. **POWSTANIU** tego stanu wskutek załączenia prądu pierwotnego towarzyszy krótkotrwały prąd indukcyjny w przewodzie wtórnym. Przy **ZNIKNIECIU** stanu „elektrotonicznego” wskutek przerwania prądu pierwotnego indukuje się w uzwojeniu wtórnem krótkotrwały prąd o kierunku przeciwnym, niż poprzednio. Ten „nowy stan elektrotoniczny” gra szczególną rolę w rozwoju poglądów Faradaya. Było to szczęśliwym



zbiegiem okoliczności, że nie porzucił go odrazu, choć spostrzegł swą omyłkę jeszcze przed ukończeniem pracy o indukcji. W tym „sta= nie elektrotonicznym” bowiem tkwi zarodek późniejszej koncepcji Faradaya o linjach sił i polu elektromagnetycznym, które przyszły na miejsce tych pierwszych niejasnych wyobrażeń o stanach w prze= strzeni otaczającej przewodnik, przez który przepływa prąd elek= tryczny.

Wyłożywszy już zjawiska indukcji wzajemnej prądów czyli - jak ją nazwał - indukcji woltaelektrycznej, Faraday przystępuje do badań wpływu żelaza na indukcję, czyli do t.zw. indukcji magneto= elektrycznej. Z okrągłej sztaby miękkiego żelaza o grubości  $7/8$  cala sporządził zamknięty pierścien o zewnętrznej średnicy 6 cali. Na jednej połowce tego pierścienia umieścił uzwojenie pierwotne, składające się z drutów, ułożonych w 3 warstwach, nawiniętych na sobie, na drugiej połowce - uzwojenie wtórne, złożone z 2 warstw. Uzwojenie wtórne połączył z galwanometrem, uzwojenie pierwotne - z baterją Volty o 10 parach płyt. W chwili załączenia baterji igiełka galwanometru odchyliła się i to znacznie silniej, niż wtedy, gdy używał baterji o 100 ogniwach i cewek bez rdzenia żelaznego. I w tym prototypie transformatora stwierdza Faraday działanie in= dukcyjne jedynie przy zmianach prądu w cewce pierwotnej. Przy uży= ciu baterji o 100 elementach występowały przy załączaniu i wyłącza= niu prądu pierwotnego działania indukcyjne tak znaczne, że, gdy Faraday załączył w obwód wtórny dwie zaostrzone i stykające się ze sobą elektrody węglowe, mógł zaobserwować małą iskierkę. Wnet też ustalił, że PRĄD INDUKCYJNY DZIAŁA TERMICZNIE, CHEMICZNIE I FIZJOLOGICZNIE, CZYLI TAK SAMO, JAK PRĄD GALWANICZNY ZE STOSU VOLTY.

Dalsze doświadczenia Faraday przeprowadza, używając żelaznego rdzenia otwartego. Dały one wyniki analogiczne do powyżej opisanych.

Przy użyciu rdzenia miedzianego otrzymał Faraday równie słabe wyniki, jak bez rdzenia. W ten sposób ustalił ważną rolę żelaza w działaniach indukcyjnych. - Dalsza serja doświadczeń przeprowa= dzona została z magnesami. Do cewki, połączonej z galwanometrem, zbliżał i oddalał Faraday magnes, stwierdzając, że przy zbliżaniu magnesu powstaje w cewce prąd, starający się znieść jego magnetyzm, a przy oddalaniu - prąd o działaniu wzmacniającym magnetyzmu magne= su. Wyniki swych doświadczeń Faraday notował z podziwu godną do= kładnością. Tak n.p. zwraca uwagę, że przy przeprowadzeniu magnesu przez cewkę otrzymuje się dwa po sobie następujące i przeciwnie skierowane wychylenia galwanometru.



Wszystkie prądy, jakie Faraday otrzymał w powyżej opisanych doświadczeniach, były tylko krótkotrwałe. Doświadczenie Arago z wirującym magnesem<sup>x)</sup> zdawało się jednak wskazywać na działania prądów indukcyjnych stale płynących. Faraday widział już w swej wyobraźni, jak w wirującej tarczy, ustawionej w pobliżu magnesu (doświadczenie Arago) płyną „jego” prądy indukcyjne. Spodziewał się, że przy ich pomocy zdoła podać teorię doświadczenia Arago.

Między biegunami silnego magnesu umieścił krążek miedziany, obracający się na osi. Sporządził dwie szczotki miedziane, które nazwał „konduktorami” i przytknął je, jedną do brzegu, drugą do osi tarczy. Galwanometr był niezbyt precyzyjnej roboty, bo składał się z dwu namagnesowanych igieł do szycia, wetkniętych w pionowe suche źdźbło słomy tak, aby tworzyły parę astatyczną. Źdźbło to było zawieszona na nitce jedwabnej w takiej wysokości, że górna igła znajdowała się tuż nad uzwojeniem galwanometru, a dolna w jego wnętrzu. I oto uzyskał Faraday w tem doświadczeniu PO RAZ PIERWSZY INDUKCYJNY PRĄD STAŁY. Gdy wprawił tarczę w ruch obrotowy, igiełki odchylały się wówczas aż do 90°. Gdy zmienił kierunek obrotów, zmienił się także i kierunek prądu. Prawo, uzależniające kierunek prądu od biegunowości magnesu i kierunku obrotów, wyraził Faraday w sposób następujący: GDY PŁASZCZYZNA TARCZY JEST POZIOMA, A TARCZA WIRUJE PRAWOSKRĘTNIE, TO PO UMIESZCZENIU POD BRZEGIEM TARCZY BIEGUNA POZŁUDNIOWEGO, ZBIERZE SIĘ NA BRZEGU TARCZY ELEKTRYCZNOŚĆ DODATNIA. TO SAMO BEDZIE, GDY ZAMIAST BIEGUNA POZŁUDNIOWEGO POD TARCZĄ UMIEŚCIMO BIEGUN PÓŁNOCNY NAD TARCZĄ.

Faraday zrozumiał natychmiast, że doświadczenie z tarczą było tylko odmianą prostszego doświadczenia, polegającego na poruszaniu przewodnika w polu magnetycznym. Doświadczenia, przeprowadzone w tym kierunku, potwierdziły w zupełności jego rozumowania. Opierając się na nich, sformułował Faraday swoje słynne prawo indukcji, wprowadzając tu po raz pierwszy pojęcie linii magnetycznych: GDY PORUSZAMY DRUT WZGLĘDNIE BIEGUNA MAGNETYCZNEGO W TEN SPOSÓB, ŻE PRZECINA LINJE MAGNETYCZNE, TO W DRUCIE TYM POWSTAJE PRĄD INDUKCYJNY. Przez linje magnetyczne rozumie Faraday linje, według których układają się opiłki żelazne w pobliżu magnesu, lub linje, do których mała igielka magnetyczna jest w każdym punkcie styczna.

x) Arago zauważył, że wahające się igielka magnetyczna uspokaja się szybciej, gdy umiessimy pod nią płytke miedziana, niż wtedy, gdy pod nią jest umieszczony izolator. Gdy tarczę miedzianą pod igielką wprawił Arago w ruch obrotowy, igielka miała tendencję do podążania za obrotem tarczy.



Teraz mógł Faraday z łatwością wytlómaczyć doświadczenie Arago. Uważając tarczę za koło o szprychach bardzo gęsto osadzonych, zrozumie się natychmiast, że w tarczy powstawał prąd w kierunku promieniowym. Prąd ten działał na magnes w ten sposób, jak w doświadczeniu z magnesem, wirującym dookoła prądu, które Faraday przeprowadził w roku 1821. Podążanie magnesu za prądem w doświadczeniu Arago zgadzało się najzupełniej z teorią Ampère'a, gdy się przyjęło kierunek prądu indukowanego w tarczy taki, jaki wypadł z prawa Faradaya.

Na tem właściwie wyczerpał Faraday wszystkie rodzaje indukcji magneto-elektrycznej. Dależe jego doświadczenia, publikowane jako t.zw. druga serja doświadczalnych badań nad elektrycznością, dotyczą indukcji w polu ziemskim i mają już raczej charakter badań magnetyzmu ziemskiego z pomocą działań indukcyjnych. Pole ziemskie jakkolwiek słabsze od pola magnesów sztucznych dawało jednak tę korzyść, że mogło być uważane za jednostajne.

W wirującej w polu ziemskim tarczy miedzianej o płaszczyźnie poziomej powstawały prądy indukcyjne, które już dość silnie działały na galwanometr. Igiełka inklinacyjna tworzyła z płaszczyzną krążka kąt  $70^{\circ}$ , który dostatecznie był zbliżony do  $90^{\circ}$ , aby otrzymać odpowiednio silne działanie indukcyjne. Gdy tarcza obracała się prawoskrętnie, t.j. według wskazówek zegarka, prąd w tarczy płynął od środka ku brzegowi. Największe działania występowały wtedy, gdy oś tarczy była równoległa do kierunku igiełki inklinacyjnej. Gdy oś tarczy była do niej prostopadła, indukcji nie było wcale.

Barlow zauważył, że kulista bomba żelazna działa na igiełkę magnetyczną inaczej w spoczynku a inaczej w ruchu. Faraday i to zjawisko tłómaczy działaniem prądów indukowanych przez pole ziemskie i urządził kilka doświadczeń, aby to dokładnie zbadać. Przypuszczał z góry, że gdy oś kuli będzie ustawiona w kierunku linii magnetycznych t.j. pod kątem inklinacji, nie popłynie żaden prąd, podobnie jak w tarczy płaskiej, gdy nie zamkniemy jej obwodu przy pomocy szczotek i drutów łączących z galwanometrem. Natomiast spodziewał się że popłynie prąd, gdy oś kuli będzie prostopadła do kierunku linii sił pola ziemskiego. Doświadczenie potwierdziło rozumowanie Faradaya w zupełności. Wirująca kula odchylała igiełki magnetyczne tak, jak się tego spodziewał. Użył był do tego doświadczenia celowo kuli z mosiądzu, a więc materiału niemagnetycznego, aby zbić rozumowanie Barlowa, który chciał tłómaczyć zjawisko „zmianą rozkładu magnetyzmu” w żelaznej bombie. -



Tak jak poprzednio uważał Faraday krążek za koło o szprychach nieskończenie gęsto umieszczonych, tak i teraz patrzył na kulę jak na zbiorowisko kolistych drutów. Widział W WYOBRAŹNI SWOJEJ LINJE MAGNETYCZNE, JAK PRZENIKAJĄ PRZESTRZEŃ I SĄ PRZECINANE PRZEZ KULĘ. Wnet też dochodzi do wniosku, że indukcja powinna wystąpić i w jednej pętli, gdy się ją obróci w przestrzeni. Dla sprawdzenia tego wygiął miedziany drut w pętlę prostokątną. Dolny bok tego prostokątu wraz z włączonym w nim galwanometrem ustalił. Górny - uczynił obracalnym dokoła dolnego. Gdy tylko wykonał pętlą ruch dokoła dolnego boku, galwanometr się wychylił. FARADAY SAM pisze o tem doświadczeniu jako o JEDYNEM W SWOIM RODZAJU, BO WYŁĄCZENIE WSZEKICH WPŁYWÓW UBOCZNYCH, PROSTOTA „APARATU” i wyraźne jego wskazanie czyni je niejako podstawowem dla zjawisk indukcji magnetoelektrycznej. Na podstawie tego doświadczenia orzeka Faraday, że w pętli, poruszanej równolegle do linii sił nie powstanie prąd. Działania indukcyjne rosną ze wzrostem kąta między kierunkiem ruchu a kierunkiem linii sił i osiągają swe maximum, gdy kąt ten wynosi  $90^{\circ}$ . Działanie na galwanometr jest w dalszym ciągu tem silniejsze, im dłuższy drut oraz im większy tor jego ruchu.

Przechodząc z wirującej kuli metalowej do kuli ziemskiej, Faraday rozumował, że i w ziemi, jako w dobrym przewodniku, muszą się indukować oba rodzaje elektryczności pod wpływem obrotu ziemi dokoła swej osi we własnym polu magnetycznym. Dodatnia - na biegunach i ujemna - na równiku. Dziś wiemy, że wniosek ten był mylny; długie jednak lata, prawie aż do naszych czasów, dyskutowano sławne doświadczenie Faradaya z magnesami wirującymi. Gdy jedni uważali, że magnes obraca się wraz z swymi linjami magnetycznymi, inni twierdzili, że linje magnesu wirującego około swej osi są nieruchome. Dziś należy przyjąć, (przynajmniej według mego zdania), że magnes wiruje wraz ze swymi linjami<sup>x)</sup>. - Faraday uważał, że gdyby można zamknąć obwód ziemi przy pomocy drutu i szczotek, przyłożonych do równika i biegunów, to musiałby popłynąć prąd. (Ten wniosek jest słuszny, o ile założymy, że drut nie będzie się obracał wraz z ziemią). Ale i bez pomocy szczotek możnaby może uzyskać prąd - rozumował Faraday, gdyby się rozpięło w kierunku południowym dwa druty z RÓŻNYCH materiałów, stykające się ze sobą tylko początkami i końcami. Przypuszczał mianowicie Faraday, że działania indukcyjne zależą od materiału przewodnika, mianowicie od jego przewodności

x) Literaturę, dotyczącą sporów na ten temat, zawiera praca Valentiner'a „Die elektrische Rotation und die unipolare Induktion”, Karlsruhe 1904.



właściwej. (Oczywiście Faraday miał tu na myśli prąd indukowany a nie SEM indukcji). Faraday wykonał rzeczywiście to doświadczenie, po którym sobie wiele obiecywał, mając na uwadze olbrzymią prędkość obwodową ziemi. Rozpiął drut miedziany i żelazny, każdy o długości 120 stóp w kierunku południka, połączył je końcami ze sobą i włączył w ten obwód galwanometr. Ale nie otrzymał żadnego wychylenia. Przypuszczał, że przyczyną ujemnego wyniku jest za mała różnica między oporem właściwym żelaza i miedzi. Dzięki wpływom osobom uzyskał od króla angielskiego pozwolenie na wykonywanie doświadczeń nad sztucznym jeziorem w ogrodzie pałacu w Kensington, aby porównać ze sobą dwa tak różne pod względem przewodności materiały, jak miedź i woda. Jezioro to nadawało się znakomicie do tego rodzaju doświadczeń, gdyż posiadało czystą i spokojną wodę. Rozpiął tedy Faraday nad jeziorem drut miedziany o długości około 600 stóp, a końce jego przylutował do dwu płyt miedzianych, zanurzonych w wodzie. Rozciął go następnie w środku i włączył tam galwanometr. Galwanometr dał wprawdzie wychylenie, ale ostrożny i krytyczny Faraday nie daje się zwieść pozornym dodatnim efektem i stwierdza natychmiast przez przecięcie galwanometru i t.p., że otrzymane prądy NIE POCCHODZĄ od działań indukcyjnych, tylko od wpływów ubocznych, jak amalgamowania się drutów (Faraday używał bowiem dla uzyskania dobrych styków miedzeczek rtęciowych), drobnych różnic w temperaturze wody w różnych miejscach i t.p. Po wyeliminowaniu tych wpływów nie otrzymał żadnego działania na galwanometr i wnosi, że nawet tak różne substancje jak woda i miedź znosiły się w skutkach indukcyjnych, gdy przecinały linje magnetyzmu pola ziemskiego z jednakową szybkością. Doświadczenia, które Faraday wykonywał potem na płynącej wodzie, nie dały innych rezultatów. Obecnie wiemy, że doświadczenia te nie mogły się udać, ponieważ druty poruszały się łącznie z polem ziemskim, a ponadto ponieważ indukowana SEM nie zależy od oporu właściwego przewodnika.

Na zakończenie swych rozważań o indukcji w polu ziemskim, Faraday wypowiedział hipotezę (jak sam zresztą przyznał - dość śmiałą), że zorze polarne pochodzą może od wyładowań elektryczności, gromadzącej się na biegunach wskutek wirowania ziemi w swym własnym polu magnetycznym. Odchylenia igiełki magnetycznej podczas zorzy polarnej, które Fox obserwował w Falmouth, zdawały się przemawiać za tą hipotezą. Obecnie wiemy, że i ten wniosek nie ma uzasadnienia, ale zupełnie pewnego wytłumaczenia zjawiska zorzy polarnej po dziś dzień nie mamy.



Doświadczenia nad indukcją pod wpływem jednostajnego pola ziemskiego potwierdziły przypuszczenia Faradaya, że DO INDUKCJI NIE JEST KONIECZNY RUCH PRZEWODNIKA Z MIEJSCA O WIĘKSZEJ GĘSTOŚCI LINIJI DO MIEJSCA O MNIEJSZEJ GĘSTOŚCI LINIJI, ALB WYSTARCZY PRZECINANIE LINIJI MAGNETYCZNYCH JEDNOSTAJNEJ GĘSTOŚCI.

Ostatniem ogniwem, zamykającym łańcuch studiów nad indukcją było zbadanie przez Faradaya samoindukcji. W r. 1834 zauważyli Jenkins i Masson, że przy przzerwaniu prądu galwanicznego w dowolnem miejscu obwodu, powstaje iskra, która jest tem silniejsza, im dłuższy jest drut. Najsilniejsze iskry powstawały przy przzerwaniu obwodu, zawierającego cewkę. Przy dotknięciu obu rękami końców cewki w chwili przzerwania prądu, uczyli Jenkins i Masson silny wstrząs. Stali wobec tego zjawiska bezradni i dopiero Faraday odkrył jego związek z dobrze mu znanymi działaniami indukcyjnymi. Wytłumaczył to zjawisko w sposób następujący: Gdy prąd znika w jednym zwoju cewki, to w sąsiednich indukuje się prąd o kierunku zgodnym. To samo dzieje się we wszystkich zwojach, działania indukcyjne się dodają, a iskra elektryczna jest właśnie objawem działania tej sumy. Przez włożenie rdzenia żelaznego do cewki, wzmocnił Faraday prąd otwarcia, który nazwał „extrapradem” - tak, że mógł nim rozżarzyć cienki drucik platynowy, albo rozłożyć jodek potasu. Faraday przewidział, że także przy zamknięciu obwodu musi powstać „extraprad”. Doświadczenie potwierdziło to przypuszczenie w zupełności; również i „extraprad” zamknięcia dawał działania cieplne i chemiczne.

Iskra wskutek działań indukcyjnych przypomina mi następującą anegdotę, opowiedzianą przez prof. Tyndalla: podczas zjazdu British Association w Oxfordzie obecne tam powagi naukowe prosiły Faradaya, aby powtórzył przy nich swe słynne doświadczenie, w którym wytwarza iskrę przy pomocy magnesu. Faraday zgodził się i wykonał eksperyment przy pomocy wielkiego elektromagnesu. Podczas doświadczenia wszedł na salę pewien dostojnik uniwersytecki i zapytał prof. Daniela, stojącego obok Faradaya, co się tu dzieje. Daniel wytłumaczył mu całe zjawisko możliwie popularnie. Dostojnik ów wysłuchał uważnie tych objaśnień, popatrzył na oślepiającą iskrę i zbierając się do wyjścia rzekł: „Bardzo żałuję, że się to udało. Będzie to nowa broń w ręku podpalaczy”. Przewidujący dostojnik nie zauważył, że ów podpalacz musiałby nosić ze sobą wielki i ciężki elektromagnes, cewkę indukcyjną i kilkaset ogniw Volty.



Opisane tu w krótkości podstawowe doświadczenia stanowią podwaliny t.zw. FARADAYOWSKIEJ INDUKCJI ELEKTROMAGNETYCZNEJ, czyli indukcji w przewodniku. Założenie, że skoro s t a ł y prąd elektryczny wznieca stały stan magnetyczny, to i s t a ł y stan magnetyczny winien wzniecić s t a ł y stan elektryczny, okazało się wprawdzie mylne, doprowadziło jednak Faradaya, po wielu latach prób, do odkrycia, że Z M I E N N E STANY MAGNETYCZNE WZNIECAJĄ ZMIENNE STANY ELEKTRYCZNE (prąd indukcyjny), oraz do drugiego zupełnie nie przewidzianego odkrycia, że RUCH PRZEWODNIKA (PĘTLI) WZGLĘDEM POLA MAGNETYCZNEGO I POLA WZGLĘDEM PRZEWODNIKA POWODUJE RÓWNIEŻ DZIAŁANIA INDUKCYJNE. -

Odkrycie PIERWSZE, sformułowane przez Faradaya w postaci prawa, że ILOŚĆ ELEKTRYCZNOŚCI WPRAWIONEJ W RUCH DZIAŁANIEM INDUKCYJNEM JEST PROPORCJONALNA DO PRZYROSTU LUB UBYTKU LINIJ MAGNETYCZNYCH OBJĘTYCH PĘTLĄ, W KTÓREJ POLE MAGNETYCZNE ULEGA ZMIANOM, STANOWI PIERWSZE GŁÓWNE I NIEWZRUSZALNE PRAWO INDUKCJI, KTÓREMU PÓŹNIEJ PRZYDA MAXWELL JUŻ TYLKO SZATĘ MATEMATYCZNĄ, DOPROWADZAJĄC JE DO POSTACI WZORU  $e = \frac{d\phi}{dt}$  ZWANEGO PRAWEM MAXWELLA.

Fundamentalny zespół z parą magnetycznie skojarzonych cewek bez rdzenia i z rdzeniem żelaznym są PROTOTYPAMI TRANSFORMATORÓW PRÓŻNIOWYCH I RDZENIOWYCH.

Odkrycie DRUGIE, sformułowane przez Faradaya w postaci prawa, że ILOŚĆ ELEKTRYCZNOŚCI, PRZEPROWADZONA PRZEZ PRZEWODNIK, PORUSZAJĄCY SIĘ W POLU MAGNETYCZNEM, JEST PROPORCJONALNA DO ILOŚCI PRZECIĘTYCH LINIJ PRZEZ PRZEWODNIK, stanowi drugie ważne prawo, które do dziś w postaci wzoru

$$e = B.v.l$$

nazywamy PRAWEM FARADAYA.

Drut, przecinający linje pola magnetycznego, to załączek, z którego wnet powstaną wszystkie maszyny elektryczne. Fundamentalne doświadczenie z tarczą miedzianą, wirującą w polu magnesu, będzie wzorem, z którego wyjdą późniejsze maszyny unipolarne.

Potężny gmach indukcji wspiera się dotąd na dwu przytoczonych powyżej prawach Faradaya. Główne fundamenty i pierwsze sklepienia tego gmachu wykonał jeden człowiek - on sam, bez niczyjej pomocy. I patrzcie - jak dobrym i przewidującym był budowniczym. Mimo, że z biegiem lat na owych fundamentach dalsi badacze stawiali nowe, coraz wyższe mury nauki, mimo, że w gmachu tym elektrotechnicy praktyczni umieszczali kolosy maszynowe wagi setek ton, fundament trzyma, a żadne ze sklepień Faradaya nie posiada nawet rysy -



tak silnie zbudował je człowiek, który zaczął od skromnego ucznia introligatorskiego!

Podstawę indukcji Faradayowskiej stanowi teza, że zjawiska indukcji (elektromagnetycznej) ujawniają się w formie prądu elektrycznego. Podłożem tego prądu może być zarówno przewodnik I-szej klasy (metal), jak i przewodnik II-giej klasy (elektrolit), wogóle materja przewodząca. W tej to materji zmiany stanu magnetycznego indukować mają - w myśl poglądów Faradaya - SEM-czne, wzniecające w obwodzie zamkniętym prąd elektryczny, tak samo, jak go wznieca w takim obwodzie SEM-czna galwanicznych lub cieplnych źródeł prądu. Bez materji niema zatem, w myśl tej koncepcji, żadnych działań indukcyjnych, bo brak jest nietylko podłoża dla prądu, lecz także siedliska dla indukowanej SEM-cznej. Rozwinięcie poglądów Faradaya doprowadziło w rozwoju kilkudziesięcioletnim do stworzenia najważniejszego działu elektrotechniki, który nosi ten sam tytuł, jaki swemu odkryciu nadał Faraday. Temu to odkryciu zawdzięczamy dziś siłę i światło elektryczne, dzięki niemu możemy przenosić energję w dal, setki kilometrów od miejsca, gdzie w druty i magnesy zaklęta została cudowna moc przyrody, odkryta przez największego geniusza epoki.

Gdy wyczerpany pracą olbrzymów, wielki syn wielkiego Narodu Angielskiego, dochodzi do kresu swej wędrówki, we Florencji Antoni Pacinotti składa mu hołd w postaci pierwszej maszyny prądu stałego (1860). Małeńki jest ten upominek: magnes, żelazo i druty - a jednak posiada tę samą czarowną siłę, co setki ogniw Volty.

Powoli i niepewnie kroczą za Faradayem pierwsi elektrotechnicy, trwożąc się, by nie stracili śladów mistrza, który daleko na przedzie wiedzy ich w nieznaną krainę wielkich możliwości. A postać mistrza zwolna chyli się ku ziemi, wołań o radę on wcale nie słucha. Słowa zaklęcia ujawnił wszem wobec, jak dobyć iskrę z żelaza i miedzi, więcej nie powie. Oczyma duszy widzi już kres swej ziemskiej wędrówki i swego następcę Maxwella. Wszak ten, tuż za nim kroczący wybraniec przyszedł na świat wtedy, gdy matka przyroda wyznała Faradayowi największą ze swych tajemnic. Porządkował mu tedy olbrzymią spuściznę, jak dobry ojciec, który już odchodzi. I nie pomylił się w swym ostatnim wniosku. Gdy bowiem żałobna wieść ogłosiła światu, że Michał Faraday nie żyje (1867), James Clark Maxwell czyni ważne postanowienie. Szybko likwiduje swe obowiązki profesorskie w Londynie, porzuca stolicę (1868) i usuwa się w zacisze wsi rodzinnej, by tam rozwijać dalej genialne dzieło Faradaya -

**INDUKCJĘ ELEKTROMAGNETYCZNĄ.**