



ROZDZIAŁ XXI.

Przemiana pracy prądu na pracę mechaniczną i odwrotnie — pracy mechanicznej na pracę prądu elektrycznego.

1. Siła działająca na prąd elektryczny w polu magnetycznym. W rozdziale I, przy określaniu pojęcia natężenia prądu elektrycznego, posługiwaliśmy się wzorem

$$dH = \frac{dl \cdot i}{r^2} \cdot \sin \alpha, \quad \dots \quad (a)$$

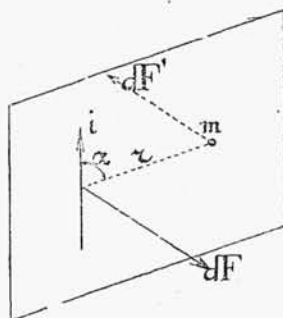
który wyraża natężenie pola magnetycznego w pewnym punkcie, znajdującym się na odległości r od środka nieskończenie małego odcinka prądu. Długość odcinka oznaczyliśmy przez dl , a natężenie prądu przez i , kąt zaś pomiędzy r i dl przez α (rys. 205)

Na północną masę magnetyczną m , od prądu i działa siła: ¹⁾

$$dF' = m \cdot dH$$

Podstawiając ze wzoru (a) wyraz dla dH , otrzymamy:

$$dF' = \frac{dl \cdot i m}{r^2} \cdot \sin \alpha.$$

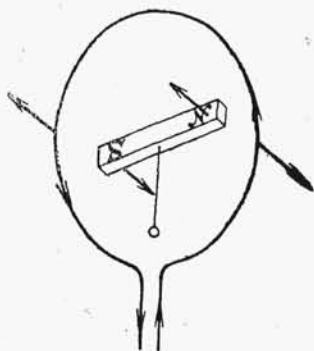


Rys. 205.

Doświadczenia stwierdzają, że magnesy, zmocowane z prądami elektrycznymi, nie okazują dążności do przesuwania się w jakąkolwiek stronę, stąd wniosek, że siły, działające od magnesów na prądy, równoważą się z siłami, działającymi od prądów na magnesy. Ta własność sił elektromagnetycznych wskazuje, że podlegają one III zasadzie mechaniki Newton'a.

¹⁾ Patrz rozdział I § 2.

Np. na rys. 206 mamy obwód kołowy, po którym przebiega prąd; w środku obwodu znajduje się magnes, którego oś leży w płaszczyźnie przewodnika kołowego. Na podstawie tego, co wiemy o kierunku linii sił pola magnetycznego wokół prądu, spostrzeżemy, że na magnes działać będzie moment obrotowy, patrząc z góry, w lewo. Jeżeli po zmocowaniu magnesu z przewodnikiem zespół ten



Rys. 206

swobodnie zawieszony ma pozostać w spoczynku, to magnes musi na prąd wywierać moment obrotowy odwrotny, t. j. w prawo. Z tego przykładu, który łatwo urzeczywistnić można doświadczalnie, wynika, że siła działania poszczególnego bieguna północnego o masie m na cząstkę prądu dl musi być skierowana tak, jak wskazuje wektor dF na rys. 205. Siła dF jest równoległa do dF' , a więc prostopadła do płaszczyzny, w której znajdują się dl i r . Dla otrzymania wyników, zgodnych z doświadczeniem, należy przyjąć, że liczbowo $dF' = dF$, a więc:

$$dF = \frac{dl \cdot i \cdot m}{r^2} \cdot \sin \alpha \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad (b)$$

Wprowadźmy do tego wzoru natężenie pola magnetycznego, wywołanego przez masę magnetyczną m w tym miejscu, gdzie znajduje się prąd. Według prawa Coulomba, podanego w rozdziale I, siła działania wzajemnego pomiędzy dwoma masami magnetycznymi m i m' , umieszczonymi w ośrodku o przenikalności magnetycznej μ , na odległości r jedna od drugiej, wyraża się wzorem:

$$f = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{m \cdot m'}{r^2} \cdot$$

Natężenie pola, według określenia w rozdziale I, jest ilorazem siły przez masę magnetyczną, na którą ta masa działa, więc natężenie pola w odległości r od masy m pod wpływem tej masy wyrażamy wzorem:

$$H = \frac{f}{m},$$

albo:

$$H = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{m}{r^2},$$

stąd:

$$\frac{m}{r^2} = \mu \cdot H.$$

Wprowadzając ten wyraz we wzór (b), otrzymamy:

$$dF = \mu \cdot H \cdot dl \cdot i \cdot \sin \alpha.$$

Iloczyn $\mu \cdot H$ jest indukcją magnetyczną B ,¹⁾ więc:

$$dF = B \cdot dl \cdot i \cdot \sin \alpha \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (c)$$

α oznacza kąt pomiędzy kierunkiem prądu i kierunkiem indukcji magnetycznej w tym miejscu, gdzie znajduje się prąd.

W tych przypadkach, gdy ośrodek stanowi powietrze, stosując układ bezwzględny jednostek elektromagnetycznych, w którym μ dla powietrza równa się jedności, możemy wzór powyższy napisać inaczej:

$$dF = H \cdot dl \cdot i \cdot \sin \alpha.$$

Należy jednak pamiętać, że w rzeczywistości H postawione jest tu na miejsce indukcji magnetycznej jako wielkość w tym przypadku jej równa.

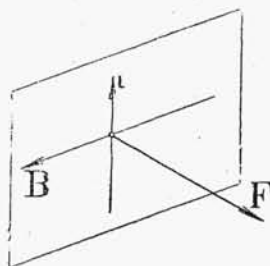
Na podstawie równania (c) łatwo wyprowadzić wzór siły F , działającej na prosty przewodnik z prądem i , którego długość l umieszczona jest w jednostajnym polu magnetycznym o indukcji magnetycznej B , prostopadle do kierunku linii indukcji ($\alpha = 90^\circ$). W tym przypadku siły, działające na poszczególne cząstki prądu, będą równoległe, wypadkowa takich sił równa się ich sumie ($\sin 90^\circ = 1$), przeto:

$$F = \int_0^l B \cdot i \cdot dl = B \cdot i \cdot l.$$

Jeżeli l wyrażamy w centymetrach a i i B w bezwzględnych jednostkach elektromagnetycznych, to otrzymamy wielkość siły w dynach.

Kierunek siły jest w związku z kierunkiem prądu i pola magnetycznego. Biorąc na uwagę, że na rys. 205 mamy masę magnetyczną północną, a linie sił magnetycznych wychodzą z masy północnej, układ trzech kierunków B , i , F przedstawi się tak, jak wskazano na rys. 207.

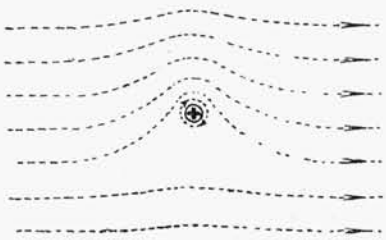
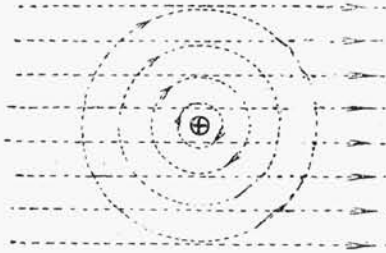
Kierunek siły działającej na prąd w polu magnetycznym, a także istotę tej siły można wyjaśnić jeszcze zupełnie inną drogą. Rozważmy prąd, płynący od nas prostopadle do płaszczyzny rysunku, w polu magnetycznym jednostajnym. Linie pola postronnego i linie pola prądu mają kształt, wskazany na rys. 208. W rzeczywistości wokół prądu mamy pole wypadkowe, którego kształt linij wskazany jest na rys. 209. Doświadczenie z opilkami potwierdza



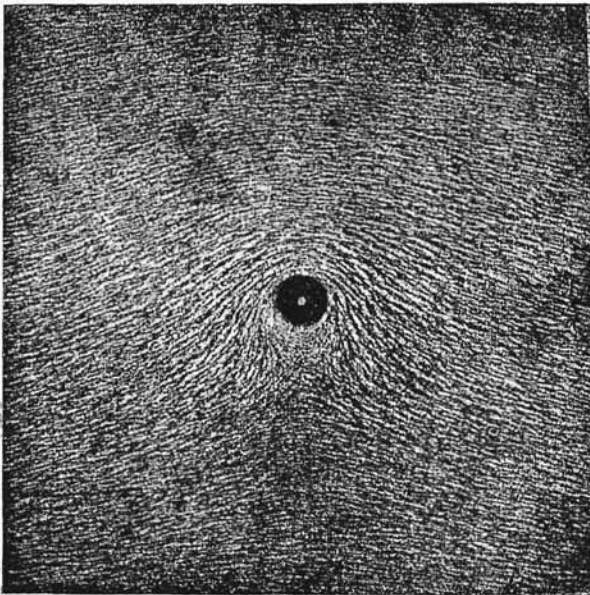
Rys. 207.

¹⁾ Patrz rozdział VI § 1 i 2.

wynik teoretycznego rozumowania; na rys. 210 widzimy odbitkę z fotografii układu opilek wokoło prądu, umieszczonego [w jednostajnym polu magnetycznym.



Rys. 208 i 2 9.



Rys. 210.

¹⁾ Patrz rozdział XXII § 4.

Wszystkie siły, działające w polu magnetycznym, można wyjaśnić, zakładając (według Faraday'a) istnienie napięć wzdłuż linii indukcji, dążących do skrócenia tych linii, i w poprzek linii — ciśnień, rozsuwających je. Wielkość napięć podłużnych i ciśnień poprzecznych jest proporcjonalna do drugiej potęgi indukcji magnetycznej.¹⁾

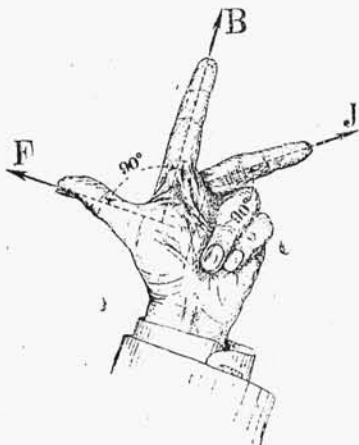
Otóż, rozważając układ linii i wielkość indukcji w polu w przypadku wskazanym na rys. 208, łatwo spostrzedz, że nad drutem natężenie pola magnetycznego zewnętrznego i pola prądu mają kierunki zgodne, a pod drutem niezgodne; wskutek tego wypadkowe natężenie pola, a więc i indukcja magnetyczna nad drutem jest większa, niż pod dru-

tem, większa jest tam również gęstość linii sił magnetycznych. Skutkiem tego ciśnienie poprzeczne jest większe z góry niż z dołu. Wypadkowa siła działa na dół.

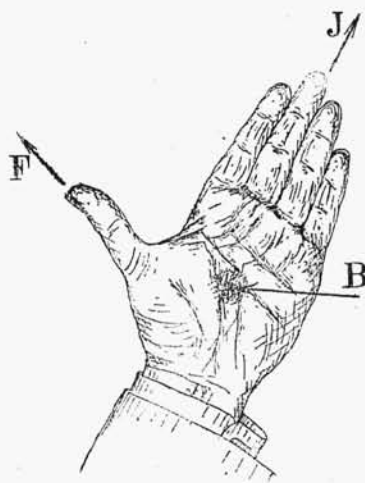
Najprostsza wskazówka pamięciowa co do kierunku siły F jest następująca: jeżeli ustawimy palec wielki i wskazujący lewej ręki w jednej płaszczyźnie, [a palec środkowy prostopadle do nich i palec wskazujący zwrócimy w kierunku

indukcji magnetycznej, a palec środkowy w kierunku prądu, to palec wielki wskaże kierunek siły (rys. 211).

Jeszcze prostszą wskazówkę pamięciową daje dłoń lewa. Gdy ustawimy dłoń lewej ręki z odchylonym dużym palcem w ten sposób, aby linie indukcji były skierowane prostopadle do dłoni, przenikając ją od wewnątrz na zewnątrz, a palce złożone razem wskazywały kierunek prądu, to duży odchylony palec wskaże kierunek siły (rys. 212).



Rys. 211.



Rys. 212

2. Praca siły, działającej na prąd elektryczny, znajdujący się w polu magnetycznym. Rozważmy ruch cząstki dl przewodnika z prądem i (rys. 213), w polu magnetycznym o indukcji magnetycznej B . Kierunek prądu jest tu pochylony pod kątem α względem natężenia pola. Przewodnik przesuwa się w ten sposób, że zachowuje swój kierunek, punkt zaś przyłożenia siły dF , działającej na przewodnik, określa drogę ds , skierowaną pod kątem β do tej siły,

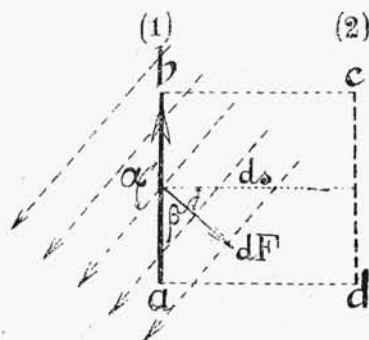
Pracę siły dF na drodze ds wyrażamy wzorem:

$$dA = dF \cdot ds \cdot \cos \beta,$$

albo, podstawiając wyraz dla dF , otrzymamy:

$$dA = dl \cdot i \cdot B \cdot \sin \alpha \cdot ds \cdot \cos \beta.$$

Iloczyn $dl \cdot \sin \alpha \cdot ds \cdot \cos \beta$ wyraża pole rzutu równoległoboku $abcp$,



Rys. 213

zakreślonego przez przewodnik w czasie ruchu, na płaszczyznę prostopadłą do B , iloczyn zaś $B \cdot dl \sin \alpha \cdot ds \cdot \cos \beta$ stanowi strumień indukcji magnetycznej, lub inaczej liczbę linii sił magnetycznych, przenikających równoległobok $abcd$. O tym strumieniu możemy powiedzieć, że został on przecięty przez przewodnik podczas jego ruchu z położenia 1 do 2.

Oznaczmy strumień indukcji magnetycznej przez $d\Phi$, wtedy:

$$dA = i \cdot d\Phi.$$

Wzór ten wskazuje, że praca siły, wywieranej przez pole magnetyczne na przewodnik z prądem, wyraża się iloczynem natężenia prądu przez strumień indukcji magnetycznej, przecięty przez ten przewodnik w czasie jego ruchu.¹⁾

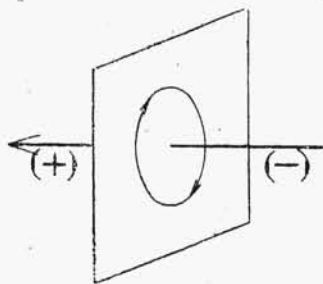
Wzór ma zastosowanie do ruchu przewodnika w dowolnym kierunku, więc zależnie od znaku $\cos \beta$, może on wyrażać pracę dodatnią lub ujemną.

Mając to na uwadze, można wzór ten stosować i do obrotowego ruchu przewodnika lub też do ruchu złożonego — postępowo obrotowego, uwzględniając, że ruch obrotowy odcinka dl około jego środka w polu jednorodnym nie daje żadnej pracy siły dF ; w tym razie bowiem odcinek przecina linie magnetyczne jedną i drugą połową w różnych kierunkach, czyli że strumienie te będą posiadały znaki różne, w sumie więc otrzymamy zero. Gdy mamy ruch przewodnika o długości skończonej, pracę sił elektromagnetycznych możemy wyrazić wzorem:

$$A = i \cdot \Phi,$$

w którym Φ jest sumą algebraiczną strumieni, przeciętych przez poszczególne cząstki przewodnika, z uwzględnieniem tego, czy praca siły działającej na tę cząstkę jest dodatnia, czy też ujemna.

W praktyce wypada częstokroć rozważać pracę, wykonaną przy ruchu obwodów elektrycznych zamkniętych, wówczas dogodniej jest posługiwać się wzorem jeszcze innym.



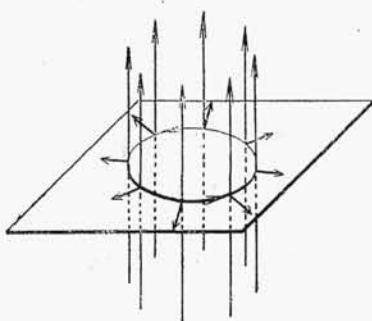
Rys. 214.

Każdy obwód elektryczny zamknięty z prądem ma dwie strony; gdy zwrócimy go do widza jedną stroną, prąd płynie zgodnie z ruchem wskazówki zegara, gdy zaś zwrócimy go drugą stroną, prąd płynie odwrotnie względem kierunku ruchu tejże wskazówki (rys. 214). Pierwszą stronę nazywać będziemy ujemną, a drugą dodatnią. Linie sił magnetycznych, wywołane przez prąd, płynący w tym obwodzie,

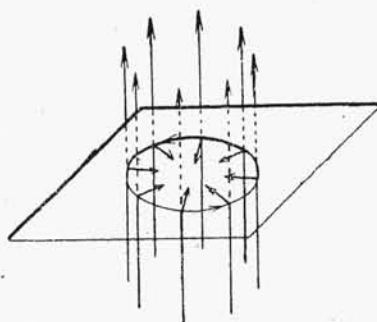
¹⁾ Taki sposób obliczania pracy wskazany był po raz pierwszy przez Faradaya.

przechodzą zawsze ze strony ujemnej na dodatnią. Linje własne i obce magnetyczne, przechodzące ze strony ujemnej obwodu na dodatnią, nazywać będziemy linjami dodatnimi, obce zaś przechodzące ze strony dodatniej na ujemną — ujemnymi.

Jeżeli obwód znajduje się w polu linji magnetycznych dodatnich, to na podstawie reguły, określającej kierunek siły działania pola na prąd, łatwo spostrzedz, że wszystkie siły, działające na poszczególne cząstki obwodu, są skierowane nazewnątrz (rys. 215), i przy ruchu cząstek obwodu w kierunku tych sił, praca wykonywana jest dodatnia, przyczem linje sił wchodzi do wnętrza obwodu. Gdy zaś linje pola są ujemne (rys. 216), siły powyższe są skierowane wewnątrz obwodu i przy ruchu poszczególnych części obwodu w kierunku tych sił linje



Rys. 215.



Rys. 216.

magnetyczne wychodzą z obwodu. Wreszcie przy ruchu poszczególnych części tych obwodów w kierunku odwrotnym praca będzie ujemna i linje dodatnie będą wychodziły, a ujemne wchodziły do obwodu.

Chcąc wyznaczyć pracę sił elektromagnetycznych, wywieranych przez pole magnetyczne na obwód zamknięty z prądem, należy obliczyć ją jako sumę algebraiczną prac poszczególnych, wykonanych przez siły cząstkowe, działające na nieskończenie małe odcinki tego obwodu. Jak widać z powyższego rozważania, prace cząstkowe są dodatnie, o ile do obwodu wchodzi linje sił dodatnich, lub też wychodzą linje sił ujemne, w przeciwnym razie prace te będą ujemne. Wielkość tych poszczególnych prac określa się liczbą linij przecinających obwód, a ponieważ każda wchodząca lub wychodząca linja musi przeciąć obwód, możemy powiedzieć, że poszczególne prace cząstkowe określają się liczbą linij wchodzących lub wychodzących z obwodu przez odpowiednie odcinki obwodu.

Cała zatem praca, wykonana przez siły elektromagnetyczne, przy ruchu obwodu zamkniętego z prądem w polu magnetycznym, może być wyrażona wzorem:

$$dA = i \cdot d\Phi,$$

Dzieląc przez i_2 i przez $d t$, otrzymamy:

$$E_B = i_2 \cdot R + \frac{d \Phi}{d t},$$

a stąd:

$$i_2 = \frac{E_B - \frac{d \Phi}{d t}}{R}.$$

Prąd i_2 jest zatem mniejszy od prądu i_1 . Wyraz zaś $\frac{d \Phi}{d t}$ oznacza siłę przeciwo-elektromotoryczną indukcji, która powstała w drucie, poruszającym się w polu magnetycznym; oznaczamy ją przez E , a wtedy:

$$i_2 = \frac{E_B - E}{R},$$

skąd:

$$E_B = i_2 \cdot R + E$$

albo

$$E_B \cdot i_2 = i_2^2 \cdot R + E \cdot i_2.$$

Z porównania tego równania z równaniem (a) wynika, że iloczyn $E i_2$ wyraża moc prądu, przetwarzającą się na pracę mechaniczną.

4. Powstanie pracy prądu elektrycznego z pracy mechanicznej.

Przemiana odwrotna zachodzić będzie wtedy, gdy przewodnik $a b$ (rys. 218) poruszać będziemy w stronę przeciwną działaniu siły F .

Załóżmy, że do przewodnika $a b$ przyłożona jest siła $F' = -F$, która równoważy siłę działania pola magnetycznego na prąd, i że przewodnik ten porusza się jednostajnie w kierunku siły F' . Niech będzie: prąd i_3 , oporność całkowita obwodu R , siła elektromotoryczna ogniwa E_B .

W tym przypadku energia, dostarczona obwodowi, będzie się składała z dwóch części: z pracy prądu powstającej z energii chemicznej w ogniwie i wynoszącej w czasie $d t$:

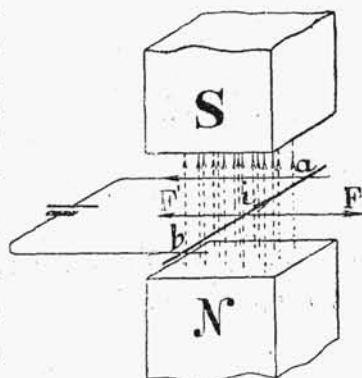
$$E_B \cdot i_3 \cdot d t,$$

a następnie z pracy mechanicznej zewnętrznej siły F' , która co do wielkości swej równa się sile F ; przy zastosowaniu przeto oznaczeń poprzednich praca ta będzie:

$$d \Phi \cdot i_3.$$

Energja, wyłaniająca się z obwodu, ma tu tylko jedną postać, mianowicie ciepło Joule'a:

$$i^2 \cdot R \cdot d t.$$



Rys. 218.

Na zasadzie prawa zachowania energii otrzymujemy wzór:

$$E_B \cdot i_3 \cdot dt + d\Phi i_3 = i_3^2 \cdot R \cdot dt.$$

Dzieląc obie strony równania przez $i_3 dt$, otrzymamy:

$$E_B + \frac{d\Phi}{dt} = i_3 R,$$

skąd:

$$i_3 = \frac{E_B + \frac{d\Phi}{dt}}{R}$$

W tym przypadku prąd i_3 jest większy od prądu i_1 , który przepływał przez przewodnik nieruchomy. Przyczyną tego jest nowa siła elektromotoryczna indukcji:

$$E' = \frac{d\Phi}{dt}$$

która powstaje przy ruchu przewodnika w polu magnetycznym. Kierunek siły jest zgodny w tym przypadku z kierunkiem prądu.

Z powyższego równania wynika, że;

$$i_3 = \frac{E_B + E'}{R},$$

skąd:

$$E_B \cdot i_3 + E' \cdot i_3 = i_3^2 \cdot R.$$

Wyraz $E' i_3$ stanowi moc prądu, otrzymaną z pracy mechanicznej zewnętrznej siły F' .

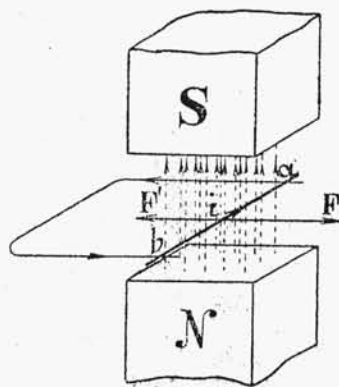
Jeżeli baterję usuniemy z obwodu, zachowując obwód zamknięty (rys. 219), a przewodnik $a b$ w dalszym ciągu będzie w ruchu, to prąd w obwodzie nie ustanie, lecz będzie inny, np. i . Wtedy:

$$i = \frac{E'}{R},$$

skąd

$$E' \cdot i = i^2 \cdot R.$$

Całe ciepło Joule'a otrzymuje się tu z pracy mechanicznej siły F' .



Rys. 219

5. Uwagi ogólne i prawa Maxwell'a i Lenz'a. Urządzenie, wskazane na rys. 219 stanowi najprostszą postać prądnicy (dynamomaszyny). Rysunek zaś 217 przedstawia w najprostszej postaci silnik elektryczny, zasilany prądem z baterji B. ¹⁾

Wszystkie wyprowadzone powyżej wzory dla prostego przypadku, mogą być zastosowane przy rozważaniu zupełnie ogólnym jakiegokolwiek dowolnego obwodu elektrycznego, poruszającego się w polu magnetycznym; należy tylko wyraz $d\Phi$ uważać jako przyrost strumienia indukcji magnetycznej objętego obwodem. Jeżeli przyrost ten jest dodatni, to siła działania pola magnetycznego na prąd wykonywa pracę i kierunek siły elektromotorycznej indukcji jest odwrotny względem prądu, jeżeli zaś przyrost ten jest ujemny, to ruch obwodu zostaje wywołany przez siły zewnętrzne, które wykonywują pracę i wtedy siła elektromotoryczna indukcji jest zgodna z kierunkiem prądu.

Mając to na uwadze i przyjmując kierunek prądu za kierunek dodatni w obwodzie (rys. 218), otrzymamy dla siły elektromotorycznej indukcji w obwodzie zamkniętym wzór:

$$E = - \frac{d\Phi}{dt}$$

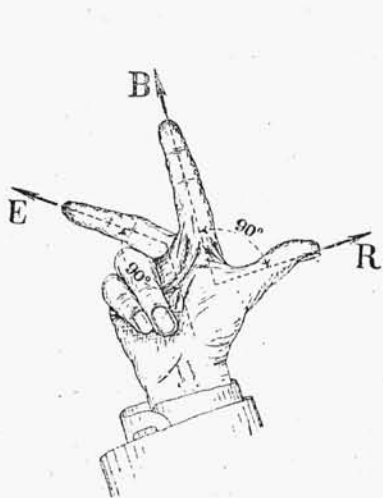
Jeżeli mamy do czynienia z obwodem, pozbawionym ogniwa galwanicznego (rys. 219) w danej chwili nieruchomym — i chcemy przewidzieć, w którą stronę będzie skierowana siła elektromotoryczna indukcji, to należy mieć na uwadze, że, stosując wzór powyższy, za dodatni trzeba przyjąć ten kierunek w obwodzie, w którym płynąłby prąd wywołujący linje magnetyczne tego samego kierunku, co linje objęte obwodem, lub też, jeżeli ich niema — co linje magnetyczne, jakie będą wchodziły do obwodu.

Kierunek siły elektromotorycznej indukcji w wypadku prostego przewodnika (rys. 219) określa się bardzo łatwo na podstawie układu trzech palców prawej ręki (rys 220). Palec wielki i wskazujący ustawiamy w jednej płaszczyźnie, środkowy zaś prostopadle do poprzednich; wtedy, ustawiając palec wskazujący w kierunku linij magnetycznych, a palec wielki w kierunku ruchu drutu, znajdziemy kierunek siły elektromotorycznej indukcji w kierunku palca środkowego.

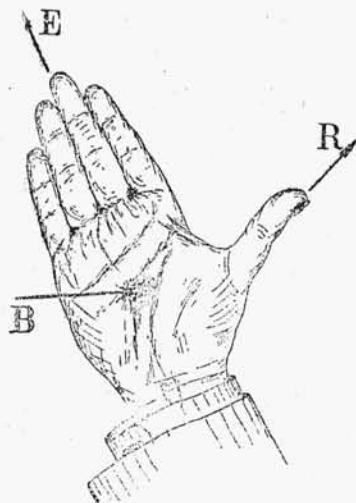
Jeszcze prostszą wskazówkę pamięciową daje **prawa dłoni** (rys. 221). Jeżeli ustawimy prawą dłoń z odchylonym w bok wielkim palcem w ten sposób, aby linje magnetyczne były do powierzchni dłoni prostopadle i pszeszywały ją z wewnątrz na zewnątrz, a duży palec wskazywał kierunek ruchu przewodnika, to pozostałe razem złożone palce wskażą kierunek siły elektromotorycznej w drucie.

¹⁾ Należy zaznaczyć, że siła elektromotoryczna indukcji powstaje także w obwodach przerwanych; wywołuje ona wtedy w miejscu przerwy równą sobie różnicę potencjałów

Rozważanie sił, działających na przewodniki z prądem, znajdujące się w polu magnetycznym i siły elektromotorycznej indukcji doprowadziło do ułożenia trzech praw bardzo prostych i ogólnych. Jedno z nich określa ruch przewodników w polu magnetycznym pod wpływem powyższej siły, a dwa inne — kierunek siły elektromotorycznej indukcji. Prawa te są często bardzo pomocne przy przewidywaniu działań, jakie zachodzą pomiędzy polami magnetycznymi a prądami.



Rys. 220



Rys. 221

Pierwsze prawo Maxwell'a. Mając na uwadze to, co było poprzednio powiedziane o liniach magnetycznych dodatnich i ujemnych (rys. 214), łatwo dostrzec że siły działania pola magnetycznego na przewodnik z prądem mogą wywołać tylko takie przesunięcia obwodu, przy których praca tych sił będzie dodatnia, przy których zatem liczba linii dodatnich, objętych obwodem, zwiększy się. Zmniejszenie się liczby linii ujemnych jest równoznaczne ze zwiększeniem się liczby linii dodatnich.

Na podstawie tej własności prądów Maxwell ułożył prawo następujące: pole magnetyczne usiłuje zawsze przesunąć obwód prądu w taki sposób, ażeby liczba objętych nim linii magnetycznych stała się możliwie wielką w znaczeniu algebraicznym, t.j. z uwzględnieniem znaków linii.

Drugie prawo Maxwell'a. Uwzględniając związek pomiędzy kierunkiem linii magnetycznych, wchodzących do obwodu, a kierunkiem siły elektromotorycznej indukcji, łatwo zauważyć, że prąd, wytworzony przez siłę elektromotoryczną indukcji (a więc zgodny z nią co do kierunku), wywołuje linie magnetyczne przeciwne tym, które wchodzą do obwodu i zgodne z temi, które wychodzą z obwodu, czyli krócej: prąd induk-

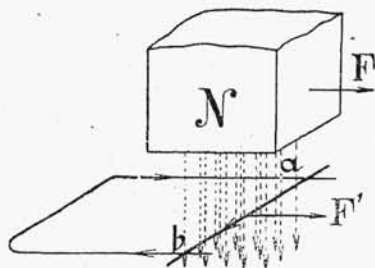
cyjny usiłuje zawsze zachować strumień magnetyczny, objęty obwodem.

Prawo Lenz'a. Prąd wytworzony przez indukcję, ma jeszcze jedną własność charakterystyczną. Rys. 219 wskazuje wyraźnie, że siła F , wywołana przez wpływ pola magnetycznego na prąd, przeciwdziała ruchowi wywołującemu ten prąd indukcyjny. Tego rodzaju działanie powyższej siły spostrzegamy zawsze w zjawisku indukcji; jest to następstwo naturalne zastosowania zasady zachowania energii do tych zjawisk. W krótkości wyraża się ta własność prądu indukcyjnego w sposób następujący: prąd indukcyjny, powstający przy ruchu przewodnika, ma zawsze względem linii sił magnetycznych taki kierunek, że działanie pola magnetycznego na prąd hamuje ten ruch.

Wszystkie wyłuszczone wyżej rozumowania można zastosować z tym samym wynikiem do tego przypadku, gdy zamiast obwodu elektrycznego poruszają się w polu magnetycznym linie magnetyczne, a obwód jest nieruchomy. Różnica zachodzi tu tylko taka, że siły, pod których wpływem praca mechaniczna powstaje lub też jest pochłaniana, są przyćpione teraz do poruszającej się materji, która wywołuje ruch linii magnetycznych, a więc do żelaza namagnesowanego, np. na rys. 219 do magnesów N , S , lub też do drutów z prądem, wywołujących pole. Praca takich sił przetwarza się na zasadzie tych samych praw w pracę prądu elektrycznego i odwrotnie. Należy tylko mieć zawsze na względzie, że kierunki ruchu, omawiane w poprzednich rozważaniach, stosują się do kierunku ruchu przewodników względem linii pola magnetycznego, kierunek zaś ruchu linii pola względem przewodników jest oczywiście zawsze odwrotny.

6. Przenoszenie pracy mechanicznej za pomocą prądu indukcyjnego. Biegun północny magnesu N (rys. 222) przesuwamy w kierunku F nad obwodem zamkniętym, którego część stanowi drut ab . Narazie obwód jest nieruchomy. Linie magnetyczne przecinają drut ab , który względem tych linii pozornie porusza się w lewo, więc powstaje w nim siła elektromotoryczna indukcji i prąd o takim kierunku, jak wskazuje rysunek. Pole magnetyczne działa na ten prąd w ten sposób, że stara się go przesunąć w kierunku siły F' (zgodnie ze wskazówkami przytoczonymi wyżej według lewej ręki).

Załóżmy, że obwód ten nie jest zamocowany, więc będzie się on poruszał w kierunku siły F' , t. j. magnes pociągnie za sobą w swoim ruchu obwód elektryczny.



Rys. 222.

Wynika to wprost z prawa Lenza. Siłę elektromotoryczną, powstającą w drucie ab , możemy wyrazić w sposób następujący: Wiemy, że nie zwracając uwagi na znak:

$$E = \frac{d\Phi}{dt}.$$

gdzie $d\Phi$ stanowi liczbę linii przeciętych przez drut w czasie dt . Załóżmy, że pole jest jednostajne, że indukcja magnetyczna równa się B , drut zaś jest skierowany prostopadłe do linii pola i porusza się w kierunku prostopadłym do drutu i do pola z szybkością v względem linii magnetycznych. Długość drutu w polu niech będzie l . Wtedy strumień indukcji, przecięty w jednostce czasu, a więc i siła elektromotoryczna wyrazi się wzorem:

$$E = B \cdot l \cdot v.$$

Jeżeli oporność obwodu jest R , to natężenie prądu w obwodzie będzie:

$$J = \frac{E}{R}.$$

albo:

$$E = J \cdot R,$$

lub mnożąc przez J , otrzymamy:

$$E \cdot J = J^2 \cdot R,$$

albo:

$$Blv \cdot J = J^2 \cdot R \dots \dots \dots (a)$$

Oznaczmy szybkość ruchu magnesu, a z nim i linii sił pola przez v_1 , a szybkość ruchu obwodu przez v_2 . Gdy w obwodzie powstaje prąd rozważanego kierunku, to $v_2 < v_1$ i $v = v_1 - v_2$.

Wprowadzając te nowe szybkości we wzór (a), otrzymamy:

$$Blv_1 J - Blv_2 J = J^2 R.$$

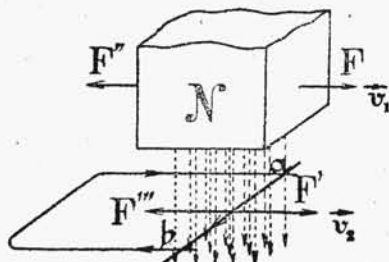
Iloczyn BlJ wyraża siłę działania pola magnetycznego na prąd, z taką samą lecz odwrotną siłą działa prąd na magnes. Oznaczmy BlJ przez F , wtedy:

$$Fv_1 - Fv_2 = J^2 R,$$

albo:

$$Fv_1 = Fv_2 + J^2 R.$$

Wzór ten wyraża zjawisko następujące (rys. 223). Jeżeli będziemy poruszać magnes ruchem jednostajnym za pomocą



Rys. 223.

siły F równej i odwrotnej do siły działania prądu na ten magnes — F'' to obwód z prądem poruszać się będzie również jednostajnie pod wpływem siły działania magnesu na prąd; siła ta $F' = F$

Ruch będzie tu jednostajny, bo siła F' pokonywa inną $F''' = F'$, pochodzącą np. od oporu tarcia drutu o podstawę, po której przesuwa się ten drut.

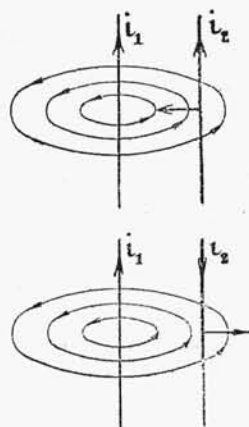
Ruch magnesu odbywa się z prędkością v_1 , a drutu z prędkością v_2 , zatem Fv_1 stanowi moc mechaniczną pracy, dostarczonej poruszającemu się magnesowi, a Fv_2 — moc pracy mechanicznej, otrzymanej podczas ruchu drutu. Z powyższego równania widzimy, że moc mechaniczna dostarczona będzie większą od mocy mechanicznej, otrzymanej na drucie, o moc zużytą na ogrzewanie drutu (ciepło Joule'a).

7. Działanie mechaniczne prądów na prądy. Jako wypadek szczególny rozważanych tu zjawisk zasługuje jeszcze na uwagę działanie mechaniczne prądów na prądy. Rozważmy dwa prądy i_1 i i_2 (rys. 224), płynące w jedną stronę. Prąd i_1 wywołuje pole magnetyczne, które działa na prąd i_2 w ten sposób, że stara się zbliżyć prąd i_2 do prądu i_1 , tak samo pole wywołane przez prąd i_2 działa na prąd i_1 w ten sposób, że stara się przesunąć prąd i_1 do prądu i_2 . Na rys. 224 wskazane jest działanie prądu i_1 na prąd i_2 . Kierunek sił łatwo sprawdzić, stosując prawidło pamięciowe trzech palców.

Krótko mówiąc, z powyższego rozważania wynika, że prądy, płynące w jedną stronę, wzajemnie się przyciągają. W podobny sposób (rys. 225) łatwo stwierdzić, że prądy, płynące w różne strony, odpychają się.

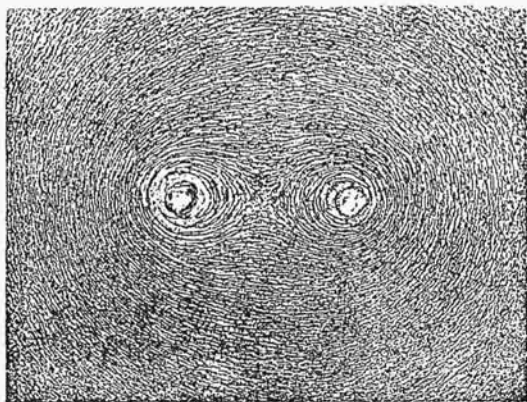
W rozważaniach powyższych uwzględnialiśmy zawsze tylko jedno pole magnetyczne, gdyż pole prostolinijnego prądu nie wywiera żadnego działania mechanicznego na prąd, który je wytwarza.

Zresztą do tych samych wyników dojść można inną drogą. Przez dodawanie natężeń pól składowych, lub też wprost doświadczalnie za pomocą opilek żelaznych, łatwo się przekonać, że w przypadku prądów, płynących w jedną stronę, linie sił magnetycznych wokół prądów mają postać wskazaną na rys. 226, a przy prądach, płynących w różne



Rys. 224 i 225.

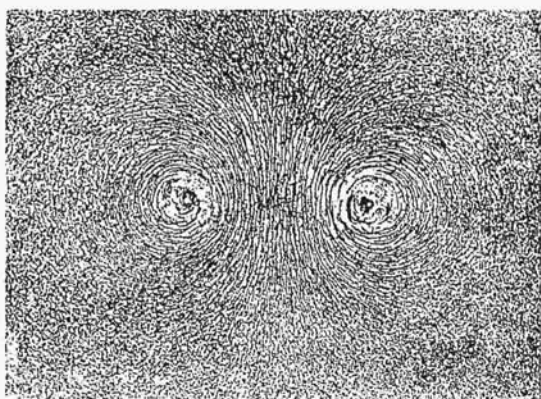
strony, na rys. 227. ¹⁾ Siły powstające w polu magnetycznym, dadzą się przewidzieć, jeżeli założymy, że wzdłuż linii działają siły, dążące do ich skrócenia, a w poprzek linii — ciśnienia, rozsuwające linie magnetyczne.



Rys. 226.

Mając te uwagi na względzie i porównawszy rys. 226 z 227 widzimy, że dążenie linii magnetycznych do skrócenia się zbliża prądy (rys. 226), a ciśnienia boczne między liniami rozsuwają prądy (rys. 227). W ten sposób możemy nieco dokładniej poznać siedlisko rozważanych sił.

Wielkość siły działania prądu i_1 na i_2 można wyrazić za pomocą wzoru. Oznaczamy indukcję magnetyczną, wywołaną przez prąd i_1 w tym miejscu, gdzie znajduje się prąd i_2 przez B , a długość drutu z prądem i_1 przez l ($l \perp B$), siła niech będzie F , wówczas



Rys. 227.

$F = B l \cdot i_2$.

Jeżeli pewien stały współczynnik oznaczmy przez k , to

$$B = k \cdot i_1$$

$$\text{i} \quad F = k l \cdot i_1 \cdot i_2,$$

albo, zakładając $k l = K$,

$$F = K \cdot i_1 \cdot i_2.$$

Współczynnik K zależy oczywiście od odległości, kształtu i położenia obwodów elektrycznych współdziałających, a także od własności magnetycznych ośrodka, w którym znajdują się prądy.

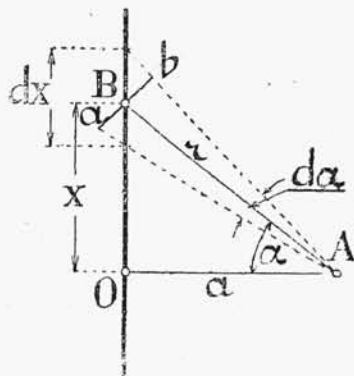
Na podstawie tych wiadomości zasadniczych możemy przewidzieć kierunek i wielkość siły współdziałania prądów gdy działają na siebie prądy różnych obwodów lub poszczególne części tego samego obwodu.

¹⁾ Są to odbitki z fotografii.

Jako przykład rozważymy dokładniej działanie prądu, płynącego po bardzo długim przewodniku prostym na inny prąd, płynący również wzdłuż prostego przewodnika. Przedewszystkiem wyznaczmy natężenie pola magnetycznego (rys. 228) na odległości a od bardzo długiego przewodnika, po którym płynie prąd i .

Na przewodniku w punkcie B obierzemy nieskończenie mały odcinek prądu, długość którego niechaj będzie dx , odległość BA oznaczamy przez r , a kąt pomiędzy r i dx przez $(90^\circ - \alpha)$, wtedy, według prawa Laplace'a, Biot'a i Savart'a¹⁾ natężenie pola magnetycznego w punkcie A , pochodzące od cząstki prądu dx będzie:

$$dH = \frac{idx}{r^2} \sin(90^\circ - \alpha) = \frac{idx}{r^2} \cdot \cos \alpha(a)$$



Rys. 228.

dx łatwo zastąpić łukiem zakreślonym z punktu A promieniem r . Łuk ten ab wyraża się za pomocą kąta $d\alpha$ wzorem:

$$ab = r \cdot d\alpha.$$

Z rysunku widzimy, że ab jest rzutem odcinka dx , zatem:

$$ab = dx \cdot \cos \alpha,$$

albo:

$$r d\alpha = dx \cdot \cos \alpha,$$

skąd:

$$dx = \frac{r d\alpha}{\cos \alpha}.$$

Podstawiając otrzymaną wartość dx we wzór (a), otrzymamy:

$$dH = \frac{i \cdot d\alpha}{r}.$$

Lecz w trójkącie ABO :

$$r = \frac{a}{\cos \alpha},$$

więc:

$$dH = \frac{i \cdot d\alpha}{a} \cdot \cos \alpha.$$

Założmy, że drut jest nieskończenie długi, wtedy całkowite natężenie pola w punkcie A będzie:

$$H = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \frac{i \cdot \cos \alpha}{a} \cdot d\alpha,$$

¹⁾ Patrz rozdział I.

skąd:

$$H = \frac{i}{a} \left[\sin \alpha \right]_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} = \frac{2 i}{a} .$$

Wzór powyższy możemy stosować do przewodników skończonych, o ile mamy do czynienia z prostym drutem, znacznej długości w porównaniu z odległością drutu od punktu, w którym obliczamy natężenie pola magnetycznego. Korzystając z wyprowadzonego powyżej wzoru, łatwo znajdziemy wyrażenie dla siły działania, jaką wywiera bardzo długi prosty przewodnik z prądem na inny przewodnik prosty, równoległy do poprzedniego i znajdujący się w pobliżu na odległości a .

Oznaczmy przez i_1 prąd w pierwszym przewodniku, a przez i_2 w drugim. Jeżeli natężenie pola w odległości a od pierwszego przewodnika będzie H , a długość przewodnika drugiego, na którą działa rozważana siła, będzie l , to wielkość siły, którą oznaczmy przez F , według poprzednich wzorów będzie:

$$F = \mu \cdot H \cdot l \cdot i_2 .$$

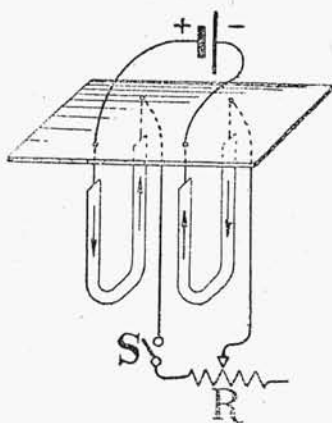
Wiemy również, że:

$$H = \frac{2 i_1}{a} ,$$

więc:

$$F = \mu \frac{2 i_1 \cdot i_2}{a} \cdot l .$$

Wzór ten wskazuje, że siła wzajemnego działania prądów zależy od przenikalności magnetycznej ośrodka. W powietrzu siła ta jest znacznie mniejsza, niż w żelazie.



Rys. 229.

Dla utworzenia sobie całokształtu pojęć o siłach, działających pomiędzy przewodnikami z prądem, należy wspomnieć jeszcze o siłach elektrycznych, wynikających wskutek działania pola elektrycznego pomiędzy przewodnikami. W celu wyjaśnienia tej sprawy zwrócimy się do doświadczenia, przeprowadzonego przez p. Nikołajewa (rys. 229). Przez dwa paski cynfolji wygięte w kształcie U i wiszące swobodnie płynie prąd do opornika R . Za pomocą wyłącznika S możemy prąd przerwać. Gdy obwód jest przerwany, działają tylko siły elektryczne, paski są połączone z różnymi biegunami źródła prądu, przeto linie sił pola elektrycznego idą od jednego paska do drugiego i paski przyciągają się.

Jeżeli prąd zamkniemy, to oprócz pola elektrycznego, powstaje jeszcze pole magnetyczne, i prądy idące, jak widać na rysunku, w różne strony, odepchną się; oczywiście łatwo jest uregulować natężenie prądu w ten sposób, aby obie siły równoważyły się. ¹⁾

Działania elektrostatyczne jednych przewodników na drugie ma znaczenie praktyczne tylko przy bardzo wysokich napięciach, gdy pole elektryczne jest dość silne.

8. Przykłady obliczenia siły elektromotorycznej indukcji.

1. Ruch przewodnika prostego w jednostajnym polu magnetycznym.

Założmy, że drut *ab* (rys. 219) ma w polu magnetycznym długość $l = 20 \text{ cm.}$ i skierowany jest prostopadłe do linii sił. Drut ten porusza się z prędkością:

$$v = 20 \text{ metrów na sekundę;}$$

indukcja magnetyczna w polu jednostajnym wynosi:

$$B = 5000 \text{ c. g s.}$$

Należy obliczyć w woltach siłę elektromotoryczną indukcji, powstającą w przewodniku. Mamy wzór następujący:

$$E = \frac{d\Phi}{dt}$$

$d\Phi$ stanowi strumień indukcji magnetycznej przecięty przez przewodnik w czasie dt .

Z warunków zadania widzimy odrazu, że strumień magnetyczny, przecinany przez przewodnik w jednostkę czasu, jest wielkością stałą w czasie; wobec tego wzór powyższy może być napisany dla wielkości skończonych w postaci:

$$E = \frac{\Phi}{t}$$

Oznaczmy przez s drogę, którą przebył w czasie t każdy punkt przewodnika; w takim razie liczba linii przeciętych w czasie t będzie:

$$\Phi = B \cdot l \cdot s,$$

lecz:

$$s = v \cdot t,$$

zatem:

$$\Phi = B \cdot l \cdot v \cdot t$$

$$\text{i} \quad E = \frac{\Phi}{t} = Blv.$$

¹⁾ Pierwszy pomysł takiego doświadczenia powziął Maxwell, który na tej drodze określał stosunek jednostek elektrycznych.

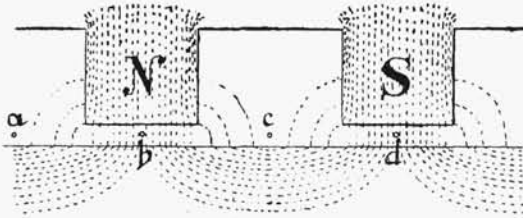
Podstawiając wartości liczbowe, wszystkie w jednostkach bezwzględnych, otrzymamy:

$$E = 5000 \cdot 20 \cdot 2000 = 200\,000\,000 = 2 \cdot 10^8;$$

a ponieważ jeden wolt = 10^8 jednostek bezwzględnych elektromagnetycznych, przeto:

$$E = 2 \text{ wolty.}$$

2. Ruch przewodnika w polu magnetycznym niejednostajnym. Pod biegunami elektromagnesów (rys. 230) porusza się drut prosty, skierowany prostopadle do płaszczyzny rysunku; prędkość ruchu jest stała i wynosi v , długość znajdująca się w polu magnetycznym — l . Indukcja magnetyczna w kierunku prostopadłym do rysunku jest stała, natomiast przy posuwaniu się wzdłuż linii $abcd$ zmienia swą wielkość i kierunek.



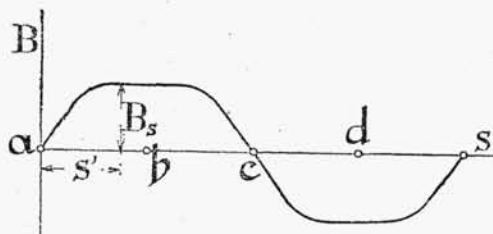
Rys. 230

Oznaczmy przez B_s rzut indukcji magnetycznej na kierunek prostopadły do drogi ruchu drutu. Załóżmy, że zależność B_s od odległości względem punktu a wyraża się pewną linią krzywą, wskazaną na rys. 231; tutaj punkty wzdłuż drogi drutu oznaczone są temi samymi literami, jak na rys. 230. Mając na względzie, że w rozważanym przykładzie linie indukcji magnetycznej są zawsze prostopadłe do drutu i, oznaczając przez B_s rzut indukcji magnetycznej na kierunek prostopadły do drogi ruchu drutu, wielkość siły elektromotorycznej otrzymamy ze wzoru:

$$E_t = B_s \cdot l \cdot v.$$

B_s oznacza rzut indukcji magnetycznej w punkcie, znajdującym się w odległości s od punktu a , a E_t — siłę elektromotoryczną w

chwili, gdy drut przechodzi przez ten punkt. B_s jest zmienne, więc i E_t jest również zmienne. Ponieważ jednak lv jest stałe, możemy powiedzieć że krzywa na rys. 231 w pewnej skali wyraża zmienność siły elektromotorycznej w zależności od drogi s . W ruchu jednostajnym droga jest proporcjonalna do czasu, w pewnej więc skali ten sam wykres wyraża też zależność siły elektromotorycznej od czasu.



Rys. 231

W praktyce zazwyczaj ma ważne znaczenie średnia siła elektromotoryczna za pół okresu. Oznaczamy przez T okres zmienności siły elektromotorycznej. Czas, w ciągu którego drut przejdzie od a do c , wynosi połowę okresu, t. j. $\frac{T}{2}$, średnią więc siłę elektromotoryczną za ten czas znajdziemy według wzoru:

$$E_s = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} E_t \cdot dt,$$

albo uwzględniając że: $E_t = B_s \cdot l \cdot v$,

$$\text{mamy: } E_t = B_s \cdot l \cdot \frac{ds}{dt}.$$

Wprowadzając wartość dla E_t pod całkę i zmieniając odpowiednio granice całki, otrzymamy:

$$E_s = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{ac}{v}} B_s \cdot l \cdot ds.$$

$B_s \cdot l \cdot ds$ stanowi strumień $d\Phi$, przecięty przez przewodnik na drodze ds więc:

$$E_s = \frac{2}{T} \int_0^{\Phi} d\Phi = \frac{\Phi}{\frac{T}{2}}$$

gdzie Φ wyraża strumień magnetyczny, przecięty przez drut na drodze ac , zarazem jest to strumień magnetyczny, wychodzący z jednego bieguna magnesu.

Założmy, że z jednego bieguna wychodzi strumień magnetyczny $1,5 \cdot 10^6$ c. g. s. czyli, jak zwykle mówi się, półtora miliona linii magnetycznych; czas, w ciągu którego przewodnik przechodzi od a do c , wynosi 0,01 sekundy. Wtedy

$$E_s = \frac{1,5 \cdot 10^6}{0,01} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ c. g. s.} = 1,5 \text{ wolta.}$$

3. Ruch obrotowy obwodu kołowego w polu magnetycznem. Obliczyć siłę elektromotoryczną indukcji, powstającą w przewodniku kołowym (rys. 232), obracającym się ze stałą prędkością kątową $n = 3000$ obrotów na minutę około osi ab , prostopadłej do linii sił magnetycznych. Indukcja magnetyczna $B = 5000$ c. g. s., a promień koła $r = 50$ cm.

Stosując ogólny wyraz elektromotorycznej siły indukcji w danej chwili t , dla obwodów zamkniętych:

$$E_t = - \frac{d\Phi}{dt}$$

w tym wypadku, zauważymy, że E będzie wielkością okresowo zmienną; łatwo nawet znaleźć zależność jej od czasu. Załóżmy że koło odchyliło się od położenia prostopadłego do linii magnetycznych o kąt α (rys. 233, widok z góry); jeżeli oznaczymy pole koła przez S , to oczywiście liczba linii magnetycznych, objętych w tym położeniu przez koło, będzie:

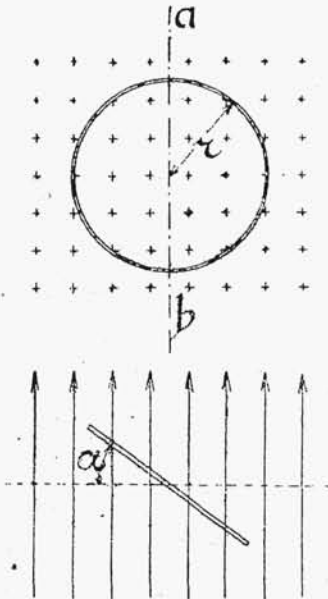
$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha.$$

Jeżeli zaś koło wykonywa jeden pełny obrót w czasie T , a w położeniu takim, jak wskazano na rysunku, t. j. pod kątem α do swego położenia początkowego, znajduje się w chwili t , to:

$$\alpha = \frac{2\pi}{T} \cdot t,$$

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \frac{2\pi t}{T},$$

$$E = B S \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot \sin \frac{2\pi t}{T}.$$



Rys. 232 i 233.

Oznaczmy BS przez Φ_m , jest to wielkość wyrażająca maksymalną liczbę linii, objętych przez obwód; oznaczmy nadto $\frac{2\pi}{T}$ przez ω . Wtedy:

$$E = \Phi_m \omega \cdot \sin \frac{2\pi t}{T}.$$

W tych więc warunkach powstaje w przewodniku kołowym siła elektromotoryczna, sinusoidalnie zmienna, której maximum będzie:

$$E_m = \Phi_m \cdot \omega.$$

Wprowadzając w te wzory wartości liczbowe, otrzymamy:

$$\Phi_m = B \cdot S = 5000 \cdot \pi \cdot 50^2 = 39250000$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2,3,14}{\frac{60}{3000}} = 314$$

$$E_m = 39250000 \cdot 314 \cdot 10^{-8} = 123,245 \text{ V.}$$

Wielkość skuteczna wypadnie:

$$\frac{E_m}{\sqrt{2}} = 87,4 \text{ V.}$$

Można też. niezależnie od powyższych wzorów, obliczyć w bardzo prosty sposób średnią siłę elektromotoryczną, np. za ćwierć obrotu, opierając się na rozumowaniu następującem:

Średnia siła elektromotoryczna za pewien czas t wyraża się wzorem:

$$E = \frac{1}{t} \int_0^t E_t \cdot dt = - \frac{1}{t} \int_0^t \frac{d\Phi}{dt} \cdot dt,$$

skąd:

$$E_s = - \frac{1}{t} (\Phi_t - \Phi_0).$$

Dajmy na to, że czas zaczynamy liczyć od chwili, gdy pole koła jest prostopadłe do linii magnetycznych; w owej chwili $\Phi_0 = \Phi_m$, po upływie zaś ćwierci obrotu pole koła będzie oczywiście równoległe do linii magnetycznych, więc $\Phi_t = 0$, czas zaś, odpowiadający jednej ćwierci obrotu, wynosi:

$$\frac{1}{4} \cdot \frac{60}{3000} = \frac{1}{200} \text{ sekundy.}$$

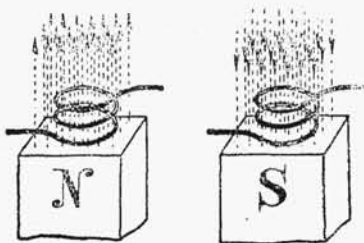
w ten sposób:

$$E_s = - \frac{1}{\frac{1}{200}} \cdot (0 - 39250000)$$

czyli:

$$E_s = 78.5 \text{ wolta}$$

4. Ruch postępowy zwojnicy nad biegunami magnesów. Nad biegunami magnesu mamy pole, którego linie magnetyczne są skierowane do góry nad biegunem północnym i na dół nad biegunem południowym. W tym polu magnetycznym umieścimy zwojnicę z drutu, o z zwojach (rys. 234). Zwojnicę tę przesuwamy z położenia I-go w II-gie. W czasie jej ruchu wytworzy się w niej siła elektromotoryczna, której zmienność w czasie moglibyśmy znaleźć, znając prędkość ruchu zwojnicy w każdej chwili, rozkład linii w polu i średnicę zwojów.



Rys. 234.

Znacznie prościej można znaleźć średnią siłę elektromotoryczną np. czas, w ciągu którego zwojnica przechodzi z położenia I-go do II-go. W zwojnicy, utworzonej z kilku zwojów, cała siła elektromotoryczna składa się z szeregu sił elektromotorycznych, powstających w poszczególnych zwojach. Wszystkie siły składowe działają w jedną stronę, ponieważ zwoje te znajdują się jeden obok drugiego, w jednakowych warunkach, są połączone w szereg i kierunek zwijania jest ten sam. Z tych rozumowań wynika, że gdy zwojnica posiada z zwojów, to całkowita siła elektromotoryczna będzie z razy większa od siły elektromotorycznej powstającej w jednym zwoju, o ile oczywiście wymiary poszczególnych zwojów, a więc i siły ich elektromotoryczne będą jednakowe.

Opierając się na wzorze, podanym w przykładzie poprzednim, całkowitą siłę elektromotoryczną średnią otrzymamy ze wzoru:

$$E_s = - \frac{\Phi_t - \Phi_o}{t} \cdot \zeta.$$

Założmy, że t oznacza czas, w ciągu którego zwojnica przeszła z położenia I-go w II-gie. E — indukcja magnetyczna, a S — pole objęte przez jeden zwój drutu, wtedy:

$$\Phi_t = B \cdot S,$$

$$\Phi_o = - B \cdot S$$

$$E_s = - \frac{2 B \cdot S}{t} \cdot \zeta.$$

Założmy, że zwojnica ma 4 zwoje, jeżeli zatem $B = 4000$, $S = 100 \text{ cm.}^2$, a $t = 0,01 \text{ sek.}$, to:

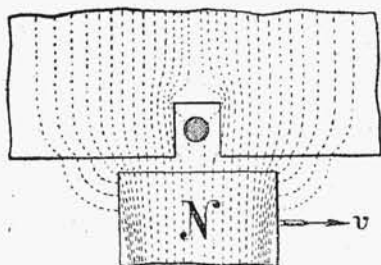
$$E_s = \frac{2 \cdot 4000 \cdot 100}{0,10} \cdot 4 = 32 \cdot 10^7 \text{ c. g. s.}$$

albo:

$$E_s = 3,2 \text{ V.}$$

Za pomocą wzoru dla średniej siły elektromotorycznej, możemy w najwięcej złożonych przypadkach z łatwością powiązać pewne wyobrażenie o wielkości sił elektromotorycznych, powstających w zwojach drutu.

5. Siła elektromotoryczna indukcji w drucie, umieszczonym wewnątrz żelaza. Przewodnik znajduje się w żłobku, wyciętym w ka-



Rys. 235.

wałku żelaza (rys. 235), u dołu przesuwamy magnes z prędkością v . Obliczyć siłę elektromotoryczną, powstającą w drucie, jeżeli indukcja magnetyczna w żelazie wynosi E_z , a długość drutu w polu magnetycznym — l .

Linie sił magnetycznych obierają zawsze drogę najmniejszego oporu magnetycznego, indukcja więc magnetyczna w żłobku wypełnionym powietrzem będzie znacznie mniejsza od indukcji w żelazie. Oznaczamy indukcję magnetyczną w żłobku przez B_p .

Gdy biegun magnesu porusza się z prędkością v , to z nim razem poruszają się linie indukcji. Lecz strumień magnetyczny nie może poruszać się z jednakową prędkością w żelazie, posiadającym indukcję B_z i w powietrzu, gdzie indukcja jest B_p . Należy przypuścić, że prędkość ruchu strumienia v' w powietrzu (w żłobku) będzie tyle razy większa od prędkości ruchu strumienia w żelazie, ile razy B_z jest większe od B_p , a więc:

$$v' = v \cdot \frac{B_z}{B_p}.$$

Mając to na uwadze, możemy obliczyć siłę elektromotoryczną w drucie według wzoru:

$$E = B_p \cdot l \cdot v'$$

albo:

$$E = B_p \cdot l \cdot v \frac{B_s}{B_p} ,$$

a więc:

$$E = B_s \cdot l \cdot v .$$

Wzór ten wskazuje, że siłę elektromotoryczną indukcji można obliczyć, nie zwracając uwagi na sposób umieszczenia drutu.

Doświadczenia potwierdzają słuszność takiego rozumowania.
