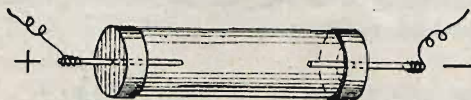


Pod wpływem prądu płyn czerwienieje wokoło bieguna ujemnego.

Gdy po przerwaniu prądu płyn skłócić; to czerwone zabarwienie znika i rurkę można znowu użyć do nowej próby.



Rys. 18.

Wszystkie te sposoby wykrywania biegunów polegają na zjawisku elektrolizy. Sól w roztworze zawarta w papierku, lub w rurce, rozkłada się pod wpływem prądu: na biegunie dodatnim wydziela się kwas, a na ujemnym ług.

Gdy mamy papierek lakmusowy przesycony odwarem z korzeni pewnej rośliny, to kwas go czerwieni, a ług niebieszczy. Biały papierek i roztwór w rurce zawierają fenolftealeinę czerwieniejącą pod wpływem ługu.

14. Prawo Joule'a*).

Wszystkie przewodniki bez wyjątku ogrzewają się pod wpływem prądu elektrycznego. Tłumaczymy to sobie tem, że przy przejściu prądu elektrycznego wewnątrz przewodników powstaje ciepło. Uczony Joule ułożył prawo, określające ilość powstającego ciepła.

Ilość ciepła, powstającego pod wpływem prądu, jest wprost proporcjonalna do drugiej potęgi natężenia prądu, do oporności przewodnika i do czasu w ciągu którego prąd przepływał.

Gdy prąd wzrośnie np. trzy razy, to ilość wydzielającego się ciepła zwiększy się dziewięć razy, jeżeli zaś opór przewodnika albo czas zwiększy się trzy razy, to ilość powstającego ciepła zwiększy się również tylko trzy razy.

Ilość ciepła mierzymy w ciepłostkach małych lub dużych (inaczej gramokalorjach i kilogramokalorjach). Jedna mała ciepłostka jest to taka ilość ciepła, która jeden gram wody

*) Czytaj Dżaula.

ogrzewa o 1° według termometru Celsiusza. Ilość ciepła, tysiąc razy większa od powyższej, stanowi kilogramokalorję czyli ciepłostkę dużą.

Z doświadczenia wiemy, że w oporze, wynoszącym jeden om, pod wpływem prądu, którego wielkość wynosi 1 amper, w ciągu jednej sekundy powstaje 0,24 małej ciepłostki.

Oznaczmy ilość ciepła w małych ciepłostkach przez Q , natężenie prądu w amperach przez I , oporność przewodnika w omach przez R , a czas w sekundach przez t , to według prawa Joule'a:

$$Q = 0,24 \cdot I^2 \cdot R \cdot t.$$

Albo inaczej oznaczając przez Q ilość ciepła w dużych kalorjach, I prąd w amperach, R oporność w omach i t — czas w godzinach wypadnie:

$$Q = 0,86 \cdot I^2 \cdot R \cdot t.$$

Mając te wzory, łatwo obliczyć ilość ciepła, powstającego w przewodnikach.

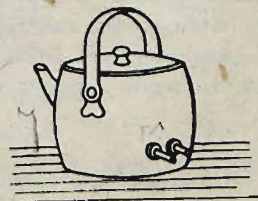
Załóżmy, że przez opornik*) mający oporność 20 omów umieszczony w imbryczku do gotowania wody rys. 19, w ciągu 10 minut (= 600 sek.) płynie prąd 5 amperów. O ile stopni ogrzeje się jeden litr wody, nalanej do tego imbryczka?

Dla rozwiązania takiego zagadnienia obliczymy przedewszystkiem ilość ciepła, powstającą pod wpływem prądu.

Według powyższego wzoru:

$$Q = 0,24 \times 5^2 \times 20 \times 600 = 72000 \text{ małych ciepłostek.}$$

Wiemy, że jedna mała ciepłostka ogrzewa 1 gr. wody o 1° . Mamy tu 1 litr wody, który zawiera 1000 gr., więc



Rys. 19.

*) Na rys. 19 widzimy dwa trzpienie wystające u dołu z imbryczka. są to końcówki tego opornika.

z 72000 małych ciepłostek na 1 gr. wody przypada tylko 72. Siedemdziesiąt dwie ciepłostki ogrzewają wodę do temperatury 72 razy wyższej, niż jedna ciepłostka, więc woda w imbryczku ogrzeje się o 72° . Należy jednak mieć na względzie, że pewna część ciepła pozostanie w ściankach imbryczka, a także zostanie uniesiona przez otaczające powietrze. Z praktyki wiemy, że zazwyczaj $\frac{1}{5}$ część ciepła, powstającego w imbryczku, nie dostaje się do wody. Należy więc przypuszczać, że woda ogrzeje się nie o 72° , ale o $57^{\circ},6$, ponieważ:

$$72 - \frac{1}{5} \times 72 = 72 - 14,4 = 57,6.$$

Powyższe obliczenie można przeprowadzić i krócej.

Wiedząc z praktyki, że tylko 80% ciepła wydzielonego w oporniku dostaje się do wody, znajdujemy ciepło w wodzie:

$$Q = 72000 \cdot 0,80 = 57600 \text{ małych ciepłostek}$$

Jeżeli oznaczymy masę wody w gramach przez m , a przyrost temperatury przez t' , to:

$$Q = m \cdot t'$$

więc:

$$t' = \frac{Q}{m}$$

albo w liczbach:

$$t' = \frac{57600}{1000} = 57,6.$$

Ciepło, wywiązujące się w przewodnikach, można obliczać jeszcze inaczej, znając napięcie na końcach przewodnika, natężenie prądu i czas.

Zachowując wyżej podane oznaczenia i wprowadzając V jako oznaczenie dla napięcia na końcach przewodnika, mamy według prawa Ohma

$$V = I \cdot R.$$

Prawo Joule'a wyraża się wzorem:

$$Q = 0,24 \cdot I^2 \cdot R \cdot t$$

albo

$$Q = 0,86 \cdot I^2 \cdot R \cdot t$$

które można napisać inaczej:

$$Q = 0,24 \cdot I \cdot I \cdot R \cdot t$$

$$\text{ i } Q = 0,86 \cdot I \cdot I \cdot R \cdot t$$

więc, uwzględniając prawo Ohma, otrzymujemy:

$$Q = 0,24 V \cdot I \cdot t$$

tu V w woltach, I w amperach, t w sekundach, Q w małych kal.

$$\text{ i } Q = 0,86 V \cdot I \cdot t$$

tu zaś V w woltach, I w amperach, t w godz. Q w dużych kal.

Przykład I. Jeżeli w ciągu 120 sekund przez pewien opornik przepływa prąd 2 ampery pod napięciem 100 woltów, to ciepło, wywiązujące się w tym oporniku, będzie:

$$Q = 0,24 \times 100 \times 2 \times 120 = 5760 \text{ małych ciepł.}$$

Przykład II. Jeżeli w ciągu 3 godzin przez pewien opornik przepływa prąd o natężeniu 2 amperów pod napięciem 220 woltów, to w tym oporniku wywiązuje się ilość ciepła:

$$0,86 \cdot 220 \cdot 2 \cdot 3 = 1135,2 \text{ dużych ciepłostek.}$$

Przyczyną powstania ciepła w przewodnikach jest ich oporność.

Przewodniki, rozprowadzające prąd w urządzeniach elektrycznych, robimy zazwyczaj z miedzi, która ma oporność właściwą małą, skutkiem tego przewodniki te ogrzewają się nieznacznie. Natomiast druty w opornikach mają oporność większą i ogrzewają się mocno. Najmocniej rozgrzewają się przewodniki wewnątrz lampek żarowych. W tych lampkach świeci rozżarzona nieraz do białości nitka węglowa lub metalowa.

Na szczególną uwagę zasługują kontakty w obwodach elektrycznych, t. j. miejsca zetknięcia poszczególnych przewodników obwodu. O ile przewodniki nie będą dość mocno

przyciśnięte do siebie, lub też powierzchnie styku nieczyste, albo za małe dla danego prądu, to w miejscu kontaktu może powstać wielki opór elektryczny. Skutkiem prądu przepływającego przez taki kontakt o dużym oporze, wywiąże się **znaczna ilość ciepła**, które nie tylko może uszkodzić przewodniki, ale nawet wywołać pożar, o ile w pobliżu znajdują się przedmioty łatwo palne. Mówimy wtedy, że wzrost temperatury przewodników nastąpił skutkiem **złego kontaktu**, czyli styku w obwodzie.

15. Moc prądu.

Z poprzedniego rozdziału wiemy, że skutek cieplny prądu zależy od jego napięcia (prężności) i wielkości czyli natężenia. Doświadczenie wskazuje, że również i skutek mechaniczny, a więc moc silników czyli motorów elektrycznych zależy od napięcia i wielkości prądu, płynącego przez silnik. Z tego powodu iloczyn napięcia przez natężenie prądu nazywamy **mocą prądu elektrycznego***).

Jako jednostkę miary mocy prądu obrano moc jednego ampera prądu, przepływającego pod napięciem jednego wolta. Taką jednostkę mocy nazywamy **jeden wat**.

Jeżeli natężenie prądu wynosi 5 amperów, a napięcie 220 woltów, to:

$$\text{moc prądu} = 220 \times 5 = 1100 \text{ watów.}$$

Ogólnie:

$$\text{moc prądu} = \text{napięcie} \times \text{natężenie prądu,}$$

albo:

$$\text{waty} = \text{wolty} \times \text{ampery.}$$

Oznaczając moc prądu przez P , napięcie przez V , a natężenie przez I , napiszemy krótki wzór literowy:

$$P = V \cdot I.$$

*) Inaczej — dzielnoscia.

Dla uniknięcia zbyt wielkich liczb często stosujemy większe jednostki miar:

1 hektowat = 100 watów

1 kilowat = 1000 watów.

Więc np. prąd 5 amperów przy napięciu 220 woltów, będzie miał moc:

$$\frac{220 \times 5}{100} = 11 \text{ hektowatów,}$$

lub:

$$\frac{220 \times 5}{1000} = 1,1 \text{ kilowata, w skróceniu: kW.}$$

16. Praca prądu.

Oprócz mocy wypada nieraz obliczać pracę prądu.

Pracę obliczamy jako iloczyn mocy prądu przez czas, w ciągu którego prąd płynął.

Za jednostkę pracy przyjmujemy pracę prądu o mocy 1 kilowata w ciągu godziny. Taką jednostkę nazywamy **kilowatogodziną**, skrót kWh.

Czasem stosujemy także jednostkę dziesięć razy, mniejszą — **hektowatogodzinę**, skrót hWh, jest to praca prądu o mocy 1 hektowata w ciągu jednej godziny, albo jeszcze jednostkę tysiąc razy mniejszą — **watogodzinę**, skrót Wh, jest to praca prądu mocy 1 wata w ciągu godziny.

Jeżeli przez t oznaczymy czas w godzinach, a przez A pracę, to zachowując inne oznaczenie poprzednie wypadnie:

$$A = P \cdot t.$$

$$\text{Praca prądu} = \text{moc prądu} \times \text{czas,}$$

albo:

$$\text{kilowatogodziny} = \text{kilowaty} \times \text{godziny.}$$

Uwzględniając zaś, że moc prądu równa się iloczynowi napięcia przez natężenie prądu, możemy napisać:

$$A = V \cdot I \cdot t$$

praca prądu = napięcie prądu \times natężenie prądu \times czas,
albo:

Watogodziny = wolty \times ampery \times godziny.

Najczęściej V — wyrażamy w woltach, I w amperach,
 t w godzinach, A zaś w kilowatogodzinach, wtedy:

$$A = \frac{V \cdot I \cdot t}{1000}$$

albo:

kilowatogodziny = $\frac{\text{wolt} \times \text{ampery}}{1000} \times \text{godziny}$.

Z powyższych wzorów widzimy, że praca prądu jest wprost proporcjonalna do napięcia, do natężenia prądu i do czasu, w ciągu którego prąd płynie.

Przykład I. Silnik elektryczny bierze 40 amperów przy 500 woltach napięcia w ciągu 10 godzin. Jaka praca prądu została pobrana przez silnik?

$$\text{Moc prądu: } P = \frac{500 \times 40}{1000} = 20 \text{ kW.}$$

Praca prądu = $20 \times 10 = 200$ kilowatogodzin, albo krócej 200 kWh.

Przykład II. W pewnym mieszkaniu płynie do lamp prąd 1,6 ampera, przy napięciu 110 woltów po 5 godzin dziennie, w ciągu 30 dni.

Jaką pracę prądu zużyły lampy?

Łącznie w ciągu 30 dni lampy paliły się:

$$5 \times 30 = 150 \text{ godzin, więc:}$$

Praca prądu $A = 110 \times 1,6 \times 150 = 26400$ watogodzin,
albo:

$$\frac{26400}{100} = 264 \text{ hektowatogodzin,}$$

albo:

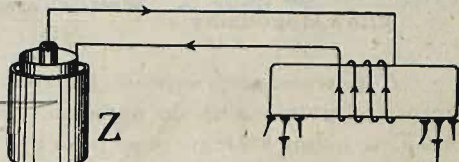
$$\frac{26400}{1000} = 26,4 \text{ kilowatogodzin, czyli } 26,4 \text{ kWh.}$$

Jeżeli wypadło płacić po 50 groszy za kilowatogodzinę, to koszt oświetlenia w ciągu miesiąca wyniósł

$$50 \times 26,4 = 13 \text{ złotych i } 20 \text{ groszy.}$$

17. Elektromagnesy i magnesy stałe.

Jeżeli owiniemy kawałek żelaza drutem izolowanym i przez ten drut przepuścimy prąd elektryczny, łącząc końce drutu z zaciskami ogniwa galwanicznego, jak wskazuje rys. 20, to żelazo nabiera własności przyciągania żelaza i innych metali np. niklu, kobaltu. Natomiast nie przyciąga miedzi, srebra, cynku i t. p.



Rys. 20.

Taką własność żelaza nazywamy **magnetyzmem**, a cały przyrząd **elektromagnesem**.

Próbując elektromagnes rys. 20 na przyciąganie w różnych miejscach, można przekonać się łatwo, że on przyciąga przedewszystkiem w końcach, sam zaś środek nie posiada własności przyciągania żelaza. Te miejsca, w których elektromagnes przyciąga żelazo, nazywamy **powierzchniami biegunowymi**, albo krócej **biegunami**, to miejsce zaś gdzie nie przyciąga — **pasem obojętnym**.

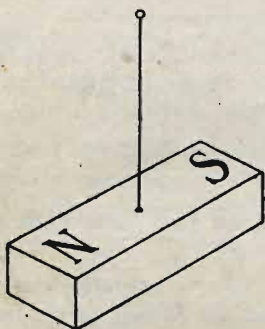
Jeżeli rdzeń żelazny elektromagnesu rys. 20 wyjmemy z uzwojenia, lub przerwiemy prąd, to własności magnetyczne nie zupełnie znikną w żelazie, szczególnie jeżeli żelazo jest twarde.

Najlepiej zachowuje własności magnetyczne pręt stalowy. Zjawisko zachowywania własności magnetycznych nazywamy **histerezą**. Powiadamy, że żelazo ma własność histerezy, której skutkiem jest **szczątkowy magnetyzm**.

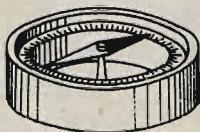
Kawałek stali, posiadający **magnetyzm szczątkowy** nazywamy **magnesem stałym**. Jest to magnes stały sztuczny. Są jeszcze

magnesy naturalne — kawałki rudy żelaznej, wykopane z ziemi i posiadające z natury własności magnetyczne.

Jeżeli magnes stały prosty z dwoma biegunami na końcach zawiesić w środku rys. 21, tak aby mógł się swobodnie obracać, to można łatwo spostrzec, że jeden biegun zwraca się zawsze na północ, a drugi na południe. Ten biegun, który zwraca się na północ, nazywamy **biegunem północnym**, ten zaś, który zwraca się na południe — **południowym**. Biegun północny oznaczamy literą *N*, albo znakiem $+$, biegun zaś południowy literą *S*, albo znakiem $-$.



Rys. 21.



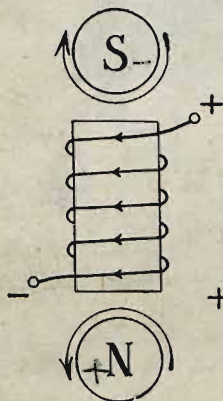
Rys. 22.

W elektromagnecie najłatwiej rozpoznać bieguny za pomocą kompasu. Najprostszy kompas stanowi **igła magnesowa**, umieszczona swobodnie na ostrzu wewnątrz okrągłego pudełka ze szklaną pokrywą rys. 22. Igłą magnesową nazywamy stalową blaszkę w kształcie wydłużonego równoległoboku, mocno namagnesowaną.

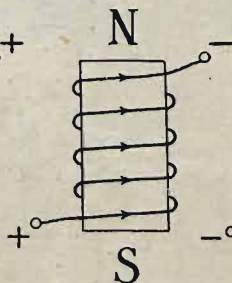
Jeżeli zbliżyć do siebie bieguny **różnoimienne** dwóch magnesów, to łatwo spostrzec, że się one **przyciągają**, gdy zaś zbliżyć bieguny **jednoimienne**, to się — **odpychają**.

Zbliżywszy kompas do elektromagnesu; zaraz spostrzeżemy, że jeden biegun igły zwróci się ku biegunowi elektromagnesu; est to więc biegun elektromagnesu odwrotny względem biegu-na igły, który zwrócił się do niego.

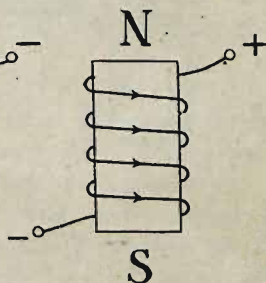
Doświadczeniem stwierdzamy, że w żelazie powstaje biegun **północny** z tej strony, z której, patrząc na biegun, widzimy prąd, płynący w kierunku **odwrotnym do kierunku ruchu wskazówek zegara**, **południowy** zaś — z tej strony, z której widzimy prąd, płynący w kierunku **ruchu wskazówek zegara**, jak to wskazano na rys. 23. U góry i u dołu elektromagnesu pokazane są na rysunku bieguny tak, jakbyśmy je widzieli, patrząc z góry i z dołu na elektromagnes.



Rys. 23.



Rys. 24.



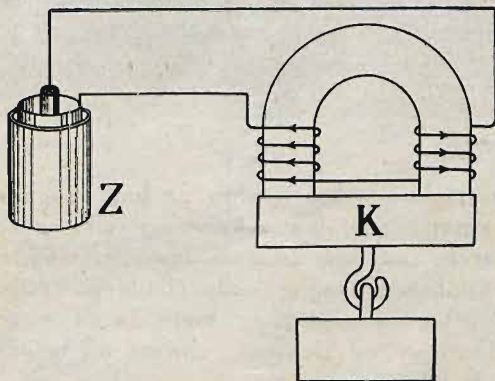
Rys. 25.

Jeżeli trzeba zmienić znak bieguna w elektromagnecie, to są na to dwa sposoby. Pierwszy polega na zmianie kierunku prądu. Odwrócenie kierunku prądu sprawia zmianę biegunów. Na rys. 23 prąd płynie z góry na dół a na rys. 24 z dołu do góry, skutkiem czego w drugim przypadku mamy bieguny odwrotne w porównaniu do pierwszego.

Drugi sposób zmiany znaku biegunów stosujemy wtedy, gdy kierunku prądu zmienić nie można; w takim razie odwracamy kierunek zwojów. Na rys. 25 prąd płynie z góry na dół tak samo jak na rys. 23, ale uzwojenie wykonane jest w kierunku odwrotnym w porównaniu do rys. 23, skutkiem czego na rys 25 mamy *S* u dołu, a *N* u góry.

W tym celu aby oba bieguny mogły podtrzymywać ten sam kawałek żelaza, elektromagnesy robimy najczęściej w kształcie podkowy rys. 26.

Tu oba bieguny elektromagnesu zwrócone są na dół i podtrzymują kawałek żelaza *K*, zwany kotwicą, na której przy pomocy haka zawieszony jest ciężar. Prądu dostarcza ogniwo *Z*.



Rys. 26.

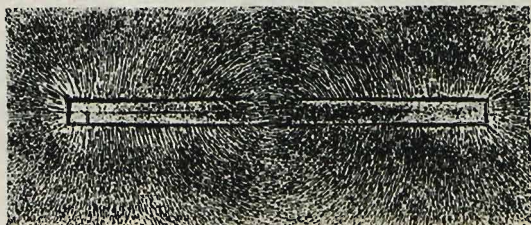
18. Strumień magnetyczny.

Położmy na prosty magnes stałą kartkę papieru i posypmy drobnymi opiłkami żelaznymi; jeżeli teraz zlekka wstrząśniemy kartką, to zaraz spostrzeżemy, że opiłki układają się w linie wybiegające z jednego bieguna magnesu i wchodzące do bieguna drugiego rys. 27.

Linie te wskazują kierunek ~~sił magnetycznych~~ wokół magnesu. Każda drobinka żelaza ~~magnezuje się~~ troszkę pod wpływem magnesu i ustawia się jak igła magnesowa w odpowiednim kierunku.

Linie wzdłuż których uskładają się opiłki, nazywamy magnetycznymi i zwykle wyobrażamy je sobie w kształcie

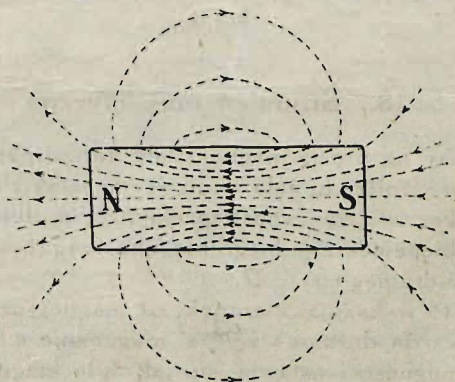
pętlic, zamykających się w środku magnesu rys. 28. Na tym rysunku oczywiście nie wszystkie linie zmieściły się całe i przez to niektóre musiały zostać przerwane — niedokończone.



Rys. 27.

Zapatrując się w ten sposób na linie magnetyczne wypada, że za pomocą opilek wykrywamy tylko część drogi linii magnetycznych, znajdującą się na zewnątrz magnesu.

Biegun północny magnesu odpycha biegun północny kompasu, według tego uważamy, że kierunek sił magnetycznych zewnątrz magnesu jest zwrócony zawsze od bieguna północnego do południowego.



Rys. 28.

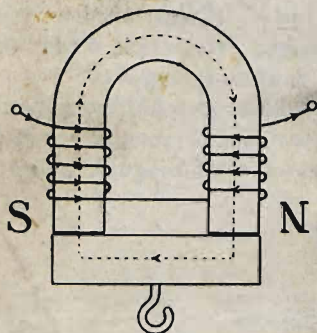
Strzałki zaznaczone na rys. 28 wskazują zwrot kierunku linii magnetycznych.

Wiązkę takich linii magnetycznych nazywamy **strumieniem magnetycznym**. Gdzie przebiega strumień magnetyczny, tam mamy tak zwane **pole magnetyczne**. Gdy magnes jest silny, to powstaje w nim dużo linii magnetycznych; mówimy wtedy, że strumień magnetyczny jest wielki, linie są gęste. **Gęstość linii magnetycznych określa magnetyczny stan żelaza, gęstość tę nazywamy także indukcją magnetyczną.**

19. Strumień magnetyczny elektromagnesów.

W elektromagnesach przebiegają również linie magnetyczne, więc tu również mamy strumień magnetyczny.

Na rys. 29 widzimy elektromagnes, w którym kierunek prądu na biegunach jest różny i skutkiem tego z prawej strony mamy biegun północny, a z lewej południowy; linia kropkowana wskazuje tu bieg strumienia magnetycznego. Drogę po której biegnie strumień magnetyczny nazywamy **obwodem magnetycznym**.



Rys. 29.

Jeżeli kotwica szczelnie przylega do biegunów elektromagnesu, to strumień magnetyczny całą drogę przebiega w żelazie. Mówimy wtedy że obwód magnetyczny jest **doskonały**. Gdy zaś pomiędzy kotwicą i biegunami są szczeliny, to taki obwód magnetyczny nazywamy **niedoskonałym**.

Elektromagnes jest tym silniejszy, im większy jest **prąd w uzwojeniu i im więcej zwojów***) nawinięto na elektromagnesie.

Mnożąc liczbę amperów prądu przez liczbę zwojów drutu, nawiniętego na elektromagnesie, otrzymujemy iloczyn, który nazywamy **amperozwojami**.

$$\text{amperozwoje} = \text{natężenie prądu} \times \text{liczba zwojów.}$$

*) Nawinąć jeden zwój znaczy raz jeden okręcić rdzeń żelazny drutem.

W praktyce najczęściej wypada obliczać ile potrzeba amperozwojów dla wywołania pewnego strumienia magnetycznego.

Przykład 1. W elektromagnesie z kotwicą zupełnie szczelnie przylegającą do biegunów rys. 29, ma być wzbudzony strumień magnetyczny, wynoszący 500000 linii; przekrój żelaza wzdłuż obwodu magnetycznego jest jednakowy wynosi 50 cm², długość średniej linii zaznaczonej kropkami na rysunku stanowi 80 cm. Mamy obliczyć potrzebną liczbę amperozwojów.

Przedewszystkiem obliczamy gęstość linii magnetycznych w strumieniu, którą oznaczamy przez B.

$$B = \frac{500000}{50} = 10000$$

linij magnetycznych na jeden centymetr kwadratowy przekroju wpoprzek strumienia.

Na zasadzie licznych badań wyznaczono ile potrzeba amperozwojów, aby wywołać strumień magnetyczny o pewnej gęstości linii magnetycznych na długości jednego centymetra.

Ta liczba amperozwojów zależy w wysokim stopniu od gatunku żelaza. Dla przykładu podajemy wyniki tych badań w tablicy dla odlewu stalowego.

Przy gęstości linii B = 10000 na 1 cm. długości strumienia magnetycznego przypada 5,7 amperozwojów.

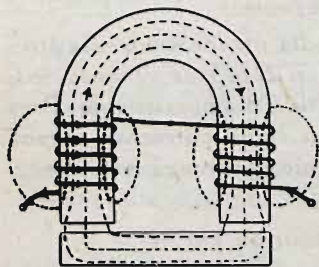
Będziemy mierzyć długość strumienia magnetycznego wzdłuż średniej linii. Według założenia długość tej średniej linii w naszym przykładzie wynosi 80 cm., więc liczba amperozwojów obu cewek magnesujących będzie:

$$5,7 \times 80 = 456 \text{ amp. zwojów.}$$

Przykład II. Mamy elektromagnes ze szczeliną powietrzną grubości 1 mm. pomiędzy podkową

B.	Amperozwoje na 1 cm.
1000	0,3
2000	0,7
4000	1,1
6000	2,4
8000	3,8
10000	5,7
12000	8,2
14000	15
16000	40
18000	115
20000	285

a kotwicą rys. 30, kotwica ma przekrój prostopadły do linii magnetycznych wynoszący 40 cm^2 , a podkowa 50 cm^2 .



Rys. 30.

Długość średniej linii w podkowie — 60 cm , a w kotwicy — 26 cm . Mamy obliczyć liczbę amperozwojów cewek magnesujących potrzebną dla wywołania w kotwicy strumienia magnetycznego, wynoszącego 500000 linii.

W obwodzie niedoskonałym mamy do czynienia zawsze ze zjawiskiem rozproszenia magnetycznego, polegającym na tem, że

część tylko strumienia magnetycznego, wywołanego przez cewki magnesujące, przenika do kotwicy. Z praktyki wiadomo, że przy niewielkich szczelinach strumień rozproszony (na rys. 30 wskazany z boku drobnymi kropkami), omijający kotwicę, stanowi 10% do 60% strumienia w kotwicy. Im większa jest szczelina, tem większe rozproszenie.

Przyjmując, że w naszym przykładzie rozproszenie stanowi 10% , wypadnie wywołać w podkowie:

$$500000 + 50000 = 550000 \text{ linii.}$$

W tych warunkach możemy przyjąć w przybliżeniu na całej długości strumienia magnetycznego w kotwicy gęstość linii:

$$500000 : 40 = 12500 \text{ linii na cm}^2,$$

a w podkowie:

$$550000 : 50 = 11000 \text{ linii na cm}^2.$$

Z tablicy na str. 53 przy gęstości linii 12500 potrzeba na jeden centymetr długości linii 10 amperozwojów, a przy 11000 , potrzeba na jeden centymetr linii 7 amperozwojów. Wobec tego dla przeprowadzenia strumienia magnetycznego przez żelazo wypadnie razem:

$$7 \times 60 + 10 \times 26 = 680 \text{ amperozwojów.}$$

Pozatem potrzebne są jeszcze amperozwoje dla przeprowadzenia strumienia magnetycznego przez dwie szczeliny powietrzne na jednym i na drugim biegunie.

Z doświadczenia wiadomo, że dla przeprowadzenia strumienia magnetycznego o gęstości linii $B = 1$ na długości jednego centymetra w powietrzu potrzeba 0,8 amperozwoja. Przy zwiększaniu się gęstości i długości linii, potrzebna liczba amperozwojów wzrasta proporcjonalnie. Na biegunach mamy gęstość linii:

$$500000 : 50 = 10000 \text{ linii na cm}^2,$$

a długość strumienia w dwóch szczelinach razem 2 mm = 0,2 cm, wobec tego nam potrzeba amperozwojów

$$0,8 \times 10000 \times 0,2 = 1600.$$

Ogółem obie cewki magnesujące mieć powinny:

$$680 + 1600 = 2280 \text{ amperozwojów}$$

Jest to obojętne, czy będzie prąd słaby i dużo zwojów, czy też prąd silny i mało zwojów, aby tylko iloczyn był ten sam.

Cewka mająca 2280 amperozwojów może być sporządzona na 10 amperów i 228 zwojów, lub na 0,5 ampera i 4560 zwojów i t. p.

Różne okoliczności, zależne od warunków pracy i przeznaczenia elektromagnesu, wpływają na ostateczny wybór najwłaściwszej liczby zwojów.

Wobec tego, że wielkość strumienia magnetycznego jest tem znaczniejsza im więcej mamy amperozwojów w cewkach, liczbę amperozwojów nazywamy nieraz siłą magnetomotoryczną.

Tej sile magnetomotorycznej przeciwstawia się oporność magnetyczna obwodu magnetycznego, zależna od wymiarów i gatunku żelaza.

Oporność obwodu magnetycznego niedoskonałego jest zwykle bez porównania większa od oporności obwodu doskonałego, gdyż oporność magnetyczna nawet cienkiej warstwy powietrza jest bardzo wielka.

Zaznaczyć jednak należy, że gdy oporność powietrza jest stała, niezależna od gęstości linii magnetycznych, to natomiast oporność magnetyczna żelaza przy zwiększaniu się strumienia magnetycznego zwykle rośnie i przy dużej gęstości linii magnetycznych jest prawie tak wielka jak powietrza. Z tego powodu w bardzo silnych elektromagnesach dalsze powiększanie prądu lub ilości zwojów mało bardzo powiększa strumień magnetyczny.

20. Siła przyciągająca elektromagnesów.

Elektromagnes przyciąga kotwicę (np. rys. 30) z siłą, która zależy od gęstości linii magnetycznych i od przekroju poprzecznego strumienia magnetycznego w szczelinie pomiędzy podkową i kotwicą.

Doświadczenie wskazuje, że siła przyciągania jest wprost proporcjonalna do drugiej potęgi gęstości linii magnetycznych i do pierwszej potęgi przekroju strumienia magnetycznego. Wielkość siły w kilogramach można obliczyć ze wzoru Maxwell'a*).

Jeżeli przez B oznaczmy gęstość linii magnetycznych, przez S pole dołnej powierzchni jednego bieguna podkowy rys. 30 w cm^2 , to siłę F przyciągania tego bieguna w kilogramach obliczymy ze wzoru:

$$F = 4,06 \left(\frac{B}{10000} \right)^2 S.$$

Przykład: Obliczmy siłę, która przyciąga kotwicę w elektromagnecie na rys. 30 przy $B = 10000$ linii na cm^2 i $S = 50 \text{ cm}^2$.

*) Czytaj Maksucla.

Według powyższego wzoru siła przyciągania jednego bieguna wynosi:

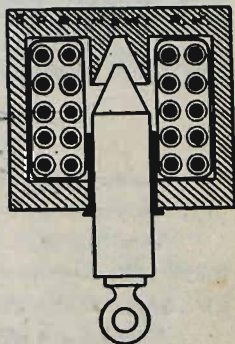
$$F = 4,06 \left(\frac{10000}{10000} \right)^2 \times 50 = 203 \text{ kg.}$$

Oba bieguny przyciągają kotwicę z siłą dwa razy większą: — 406 kg.

Wszystkie elektromagnesy mają tę własność, że gdy kotwica znajduje się daleko od biegunów to strumień magnetyczny jest mały i siła przyciągania niewielka. W miarę tego jak kotwica do biegunów zbliża się, strumień magnetyczny rośnie, a więc rośnie i gęstość linii magnetycznych, skutkiem czego mamy bardzo znaczny wzrost siły przyciągającej kotwicę. Przy dwukrotnym wzroście gęstości linii, czterokrotnie wzrośnie siła. Siła ta będzie największa, gdy kotwica dotknie biegunów podkowy.

Dla zwiększenia skoku kotwicy bez znacznego powiększenia szczeliny, sporządzamy elektromagnesy z jedną cewką magnesującą i ruchomym rdzeniem w środku, ściętym w kształcie stożka rys. 31.

Zwoje cewki, umieszczonej wewnątrz okrągłej żelaznej skrzynki, wytwarzają strumień magnetyczny zamykający się przez ścianki tej skrzynki. Skutkiem tego układ obwodu magnetycznego, wskazany na rys. 31, posiada jeszcze tę wielką zaletę, że nawet przy znacznej szczelinie powietrznej ma bardzo małe rozproszenie magnetyczne.

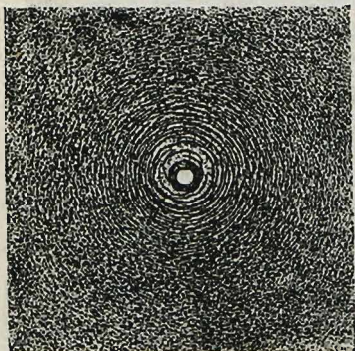


Rys. 31.

21. Własności magnetyczne przewodników z prądem.

Przewodniki z prądem mają niektóre własności podobne do magnesów. Jeżeli wokół prostego przewodnika z prądem, przetkniętego przez kartkę papieru, posypać opilek że-

laznych i kartkę papieru z opiłkami zlekką wstrząsność, to opiłki układają się w kółka, otaczające przewodnik rys. 32. Kółka te są linjami magnetycznymi przewodnika z prądem.



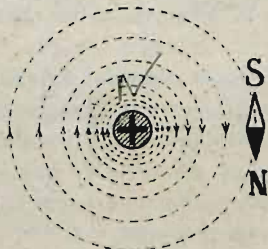
Rys. 32.

Igła magnesowa kompasu, umieszczonego w pobliżu tego przewodnika ustawia się wzdłuż linii magnetycznych i północny biegun igły magnesowej zwraca się w tą lub ową stronę, zależnie od kierunku prądu. ~~Gdy prąd płynie z góry na dół,~~ jak to wskazuje rys. 33, to igła magnesowa zwraca się północnym końcem w stronę strzałek, wskazanych na rysunku. Jeżeli by prąd zmienił kierunek na odwrotny, to igła magnesowa odwróciłaby się.

Zależność kierunku linii magnetycznych od kierunku prądu wyraża prawo Maxwella*).

Według tego prawa linie magnetyczne, wokoło prądu, mają taki kierunek jak ruch obrotowy śruby z prawym gwintem wkręcanej w kierunku prądu rys. 33.

Na rys. 33 prąd płynie w głąb rysunku, więc śrubę należy wystawić sobie postawioną prostopadle do książki i wkręcać w książkę. Jeżeli by prąd płynął do góry, to należało by mieć na względzie śrubę, wkręcaną, taka śruba obracała by się w stronę przeciwną strzałkom wskazanym na rysunku.



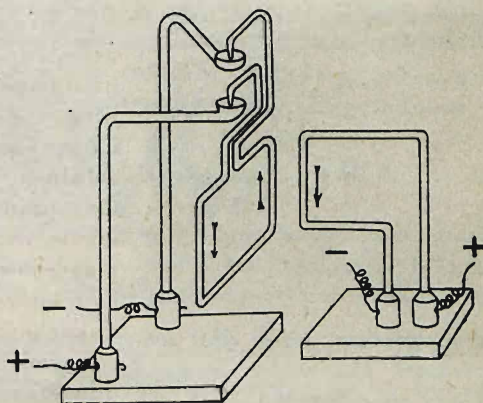
Rys. 33.

Doświadczeniem łatwo stwierdzić, że skutkiem obecności strumienia magnetycznego wokoło prądu, przewodniki z prądem odpychają się, lub przyciągają się

*) Czytaj Maxwella.

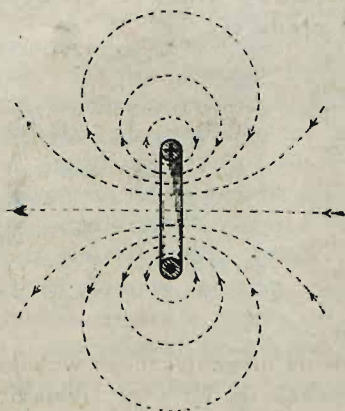
zależnie od tego czy prądy są skierowane w różne strony, czy też w jednakowe. Wykazać to można na przyrządzie, który widzimy na rys. 34. Mamy tu dwie ramki z drutu, po których płyną prądy.

Ramka z prawej strony jest nieruchoma, natomiast ramka z lewej strony jest zawieszona w ten sposób, że może się obracać. Jeżeli zbliżymy druty, w których prądy płyną w różne strony, tak jak wskazano na rysunku, to druty te będą się odpychać i ruchoma ramka obróci się w lewo. Jeżeli byśmy



Rys. 34.

przesunęli nieruchomo umocowaną ramkę naprzód, tak aby zbliżyły się dwa druty, w których prądy płyną w jedną stronę — oba w dół, to takie druty przyciągnęłyby się.



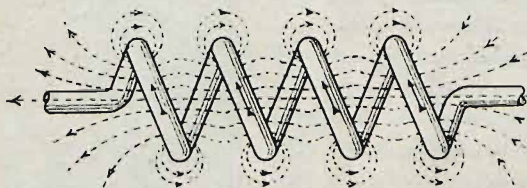
Rys. 35.

Jeśli druty z prądami krzyżują się, to takie druty starają się ustawić równolegle względem siebie w ten sposób, aby oba prądy płynęły w jedną stronę.

Jeżeli przewodnik z prądem zgiąć w kształcie obwodu koła, to linie magnetyczne przybierają kształt, wskazany na rys. 35. Tutaj przewodnik jest przedstawiony w przecięciu, okrąg koła należy sobie wystawić usta-

wiony prostopadle do książki, jedną połowę nad rysunkiem, drugą połowę pod rysunkiem.

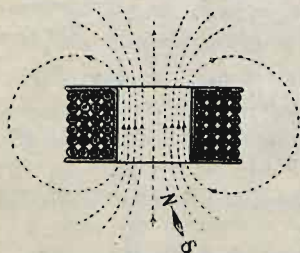
Tę stronę kołowego przewodnika z prądem, z której linie magnetyczne wychodzą, nazywamy północną, a tę, przez którą wchodzi — południową, oczywiście przez porównanie



Rys. 36.

z magnesem. Jeżeli drut tworzy kilka zwojów, to taki zespół zwojów nazywamy zwojnicą, albo szpulą czy też cewką. Linie sił magnetycznych w zwojnicy, mającej zwoje rozstawione szeroko, widzimy na rys. 36. I tu mamy stronę północną i południową. Z lewej strony północna z prawej południowa.

W praktyce częściej wypada nawijać drut izolowany szczelnie na drewniane, tekturowe, lub metalowe ramki wyło-



Rys. 37.

żone izolacją, tak jak to wskazano w przekroju na rys. 37. Wszystkie tego rodzaju zwojnice pod względem własności magnetycznych są podobne do prostych magnesów i elektromagnesów. Na końcach takich zwojnic mamy jakgdyby bieguny *N* i *S*. Biegun *N* — z tej strony skąd widzimy prąd

płynący przeciw kierunkowi ruchu wskazówki zegarka i *S* — z tej strony, z której widzimy prąd, płynący w kierunku ruchu wskazówki zegarka.

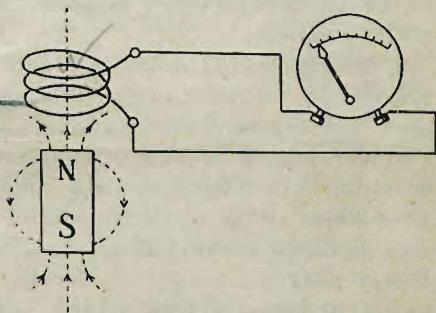
Wielkość strumienia magnetycznego zwojnicy, tak samo jak w elektromagnesach, zależy od liczby jej amperozwojów i od jej kształtu.

Współdziałanie mechaniczne biegunów zwojnic pomiędzy sobą, a także działanie biegunów magnesów stałych na bieguny zwojnic i odwrotnie, podlegają tym samym prawom co współdziałanie magnesów stałych: bieguny jednoimienne odpychają się, a różnoimienne przyciągają się, północny biegun przyciąga południowy, a odpycha północny, natomiast biegun południowy przyciąga północny, a odpycha południowy.

22. Indukcja prądów.

Szczególnie ważne znaczenie w urządzeniach elektrycznych mają prądy powstające skutkiem tak zwanej indukcji. Najważniejsze wypadki indukcji czyli wzniesienia prądów są następujące:

Zwoj drutu, połączony z galwanoskopem*) rys. 38 znajduje się w pobliżu stalowego magnesu stałego. O ile zwoje drutu i magnes pozostają nieruchome, to w obwodzie galwanoskopu nie spostrzegamy żadnego prądu. Jeżeli jednak będziemy poruszać zwojami drutu, lub magnesem w ten sposób, aby druty przecinały linje magnetyczne, to w czasie przecinania linji magnetycznych przez druty, galwanoskop odchyli się, powstanie prąd elektryczny wytworzony przez siłę elektromotoryczną, wytwarzającą się



Rys. 38.

w drutach, przecinających linje magnetyczne. Galwanoskop odchyła się w różne strony, zależnie od kierunku prądu.

Zbliżając magnes do zwojów drutu, otrzymamy prąd w jednym kierunku, a oddalając go — w kierunku przeciwnym.

*) Galwanoskop jest to przyrząd do wykrywania prądu. Patrz opis dalej.

Pozatem kierunek prądu jest różny, zależnie od tego, którym biegunem magnes jest zwrócony do zwojów drutu.

Prąd indukcyjny ma zawsze taki kierunek, że na zwojnicy wytwarza biegun magnetyczny, zgodny z przybliżającym się biegunem magnesu i odwrotny względem oddalającego się bieguna magnesu.

Mając na względzie, że jednoimienne bieguny magnetyczne odpychają się, a różnoimienne przyciągają się — spostrzeżemy, że prąd indukcyjny ma zawsze taki kierunek, przy którym powstają siły, przeszkadzające ruchowi, wywołującemu ten prąd*).

Wielkość prądu indukcyjnego, według prawa Ohma, zależy od wielkości siły elektromotorycznej indukcji i od oporności obwodu.

Gdy magnes będziemy wolno zbliżać lub oddalać, to siła elektromotoryczna będzie mała, im ruch będzie szybszy tym większą będzie siła elektromotoryczna.

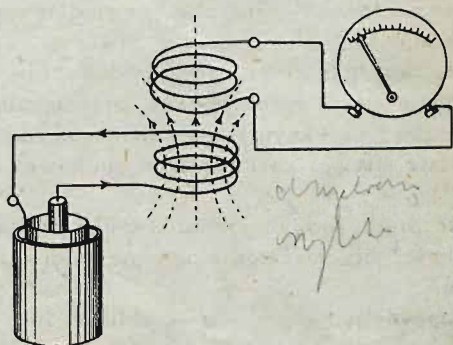
Pozatem tem większą otrzymamy siłę elektromotoryczną, im silniejszy weźmiemy magnes i im więcej zwojów zwinimy w zwojnicy.

Inny przykład indukcji prądów mamy przedstawiony na rys. 39. Tu magnes zastępuje zwojnica z drutu, zasilana prądem stałym z ogniwa. Z poprzedniego rozdziału wiemy, że zwojnica taka z prądem, ma strumień magnetyczny podobny do strumienia magnetycznego magnesu prostego.

Mając to na względzie, łatwo przewidzieć, że gdy zwojnice są nieruchome, to żaden prąd indukcyjny nie powstanie, a przy poruszaniu zwojnicy dolnej, albo górnej linje magnetyczne przecinają zwoje górne i wtedy powstanie w nich siła elektromotoryczna indukcji. Kierunek prądu indukcyjnego odpowiada prawu Lenz'a, więc prąd indukcyjny wytwarza w zwojach górnych u dołu biegun odwrotny od oddalającego się bieguna zwojów dolnych i zgodny z przybliżającym się biegunem tych zwojów.

*) Jest to prawo Lenza (czytaj Lenca), stosujące się do wszystkich przypadków indukcji.

Siła elektromotoryczna indukcji jest tu wprost proporcjonalna do amperozwojów zwojnicy zasilanej prądem z baterji, do szybkości ruchu zwojnicy jednej względem drugiej i do ilości zwojów w zwojnicy połączonej z galwanoskopem:



Rys. 39.

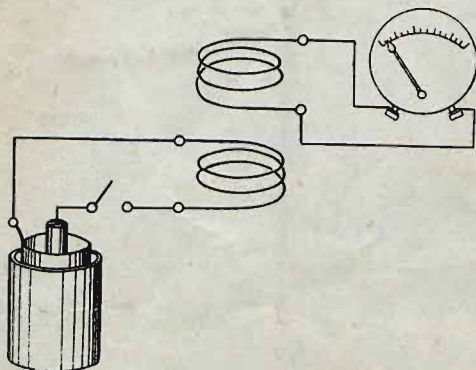
Dla wzmożenia indukcyjnego działania zwojnicy dolnej, w praktyce często umieszczamy wewnątrz niej rdzeń żelazny, skutkiem czego wzmacnia się znacznie strumień magnetyczny.

Prąd indukcyjny można wywołać także nie poruszając zwojnicami, jeżeli umieścić w obwodzie z ogniwem przerywacz rys. 40. W chwili przerywania i zamykania obwodu dolnego powstaje w obwodzie górnym chwilowy prąd indukcyjny. Przy zamykaniu obwodu dolnego prąd indukcyjny, powstający w obwodzie górnym, wytwarza linie magnetyczne, odwrotne do tych, które powstają w zwojnicy dolnej, a przy przerywaniu obwodu dolnego prąd indukcyjny wytworzy linie magnetyczne, zgodne z liniami ginącego prądu w zwojnicy dolnej.

Obwód z ogniwem nazywamy obwodem pierwotnym, a obwód połączony z galwanoskopem — wtórnym. Siła elektromotoryczna indukcji, powstająca w obwodzie z galwanoskopem, wzrasta proporcjonalnie do amperozwojów zwojnicy pierwotnej, połączonej z ogniwem, do liczby zwojów

zwojnicy wtórnej i do prędkości z jaką prąd wzrasta przy powstaniu i maleje przy zanikaniu.

Zamiast przerywania prądu, można go w obwodzie pierwotnym zwiększać lub zmniejszać, za pomocą opornika, umieszczonego w tym obwodzie.



Rys. 40.

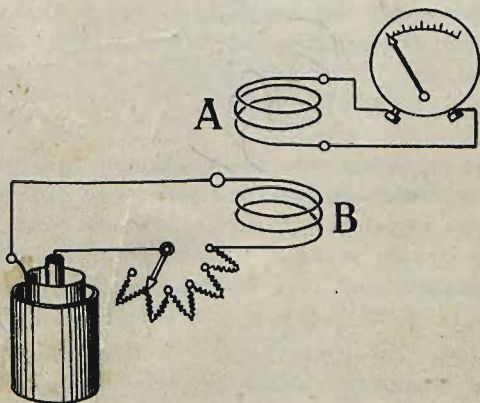
Przy przesuwaniu rączki opornika w obwodzie *B* rys. 41 spostrzeżemy w obwodzie *A* prąd indukcyjny.

Przy zmniejszaniu prądu pierwotnego kierunek prądu indukcyjnego będzie taki sam, jak przy przerywaniu, a przy zwiększaniu prądu taki, jak przy zamykaniu.

Wielkość siły elektromotorycznej indukcji wzrasta w miarę zwiększania szybkości ruchu rączki.

Powstawanie siły elektromotorycznej indukcji we wszystkich rozważonych wypadkach, można sprowadzić do tej samej przyczyny — przecinania linii magnetycznych przez druty w których powstaje prąd indukcyjny. Tam, gdzie mamy ruch magnesu czy zwojnic jest to oczywiste, tam zaś gdzie niema widocznego ruchu przedmiotów, to poruszają się linje magnetyczne. Gdzie po zamknięciu włącznika powstaje prąd w obwodzie pierwotnym rys. 40, lub gdzie przesuwamy rączkę

w oporniku rys. 41 w prawo, to w miarę wzrostu prądu wo-koło zwojnicy powstają linie magnetyczne, które wybiegają z drutów z prądem, zakreślają coraz szersze kręgi, jak fale, tworzące się na gładkiej powierzchni wody, gdy w nią rzucić kamień. Te rozbiegające się linie magnetyczne przecinają druty górnych zwojnic.



Rys. 41.

Gdy prąd przerywamy, lub osłabiamy, przesuując rączkę opornika w lewo rys. 41, to linie magnetyczne kurczą się, wędrują w stronę odwrotną i znowu przecinają druty górnych zwojnic.

W obu więc wypadkach otrzymujemy prądy indukowane, ale odwrotnych kierunków.

Zastanawiając się nad opisaniami powyżej sposobami indukowania prądów łatwo spostrzec, że przecinanie linii magnetycznych przez zwoje drutu, zachodzi zawsze, gdy zmienia się liczba linii magnetycznych objętych przez zwojnicę, gdyż oczywiście każda linia magnetyczna, przecinając druty, wchodzi czy wychodzi z wnętrza cewki. Na tem polega

sposób obliczenia wielkości średniej siły elektromotorycznej indukcji, powstającej w obwodzie z galwanoskopem.

Oznaczamy przez Φ_1 strumień magnetyczny, który obejmuje zwojnica górna w pewnej chwili. Po upływie czasu t sekund strumień ten zmienił się i wielkość jego jest Φ_2 . Jeżeli zwojnica górna ma n zwojów, to średnia siła elektromotoryczna powstająca w tej zwojnicy w czasie zmiany strumienia magnetycznego wynosi E woltów* i oblicza się według wzoru:

$$E = - \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t} \cdot n \cdot 10^{-8}$$

Handwritten notes: "strumień magnetyczny" above the formula, "siła elektromotoryczna" and "indukcji" to the left, "n - liczba zwojów" to the right.

Oprócz wielkości, ten wzór wskazuje również kierunek siły elektromotorycznej. Jeżeli ze wzoru wypadnie siła elektromotoryczna dodatnia, to znaczy że ona jest skierowana w tą samą stronę, w którą płynie prąd, wzbudzający taki strumień magnetyczny jaki był na początku lub też, jeżeli na początku nie było żadnego, to taki jaki wszedł do zwojnicy.

Przykład. Zwojnica, mająca 2000 zwojów i znajdująca się zdala od magnesu, została raptem w ciągu 0,1 sekundy nasadzona na środek magnesu rys. 38, którego strumień magnetyczny wynosi 5000 linij magnetycznych. Jaka średnia siła elektromotoryczna powstała w zwojach?

Tu mamy strumień $\Phi_1 = 0$, $\Phi_2 = 5000$; $n = 2000$, więc według powyższego wzoru:

$$E = - \frac{5000 - 0}{0,1} 2000 \cdot 10^{-8} = -1 \text{ wolt.}$$

Znak minus wskazuje, że kierunek siły elektromotorycznej jest odwrotny do kierunku tego prądu, który wywołałby strumień magnetyczny zgodny ze strumieniem magnetycznym magnesu.

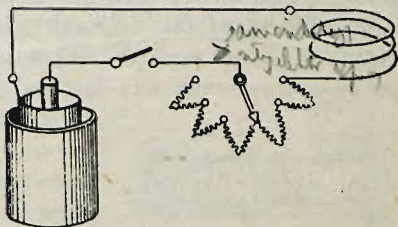
Przykład powyższy wyraźnie wskazuje, że tem większą otrzymamy siłę elektromotoryczną indukowaną, im większa będzie zmiana strumienia magnetycznego, im krótszy będzie czas, w którym ta zmiana zachodzi, a także im więcej zwojów zwiniemy w zwojnicy.

23. Samoindukcja.

Zmienny strumień magnetyczny wywołuje siłę elektromotoryczną indukcji nie tylko w obwodach wtórnych, ale i w obwodzie pierwotnym. Powstanie prądów indukcyjnych w tym samym obwodzie, w którym płynie prąd, wywołujący indukcję, nazywamy **samoindukcją**.

Siła elektromotoryczna samoindukcji powstaje zawsze w chwili zmiany natężenia prądu, a więc przy przerywaniu i zamykaniu obwodu, a także przy przesuwaniu rączki opornika rys. 42.

Kierunek siły elektromotorycznej samoindukcji jest **zgodny** z kierunkiem prądu przy **przerywaniu** lub **zmniejszaniu** prądu i **odwrotny** do tego kierunku przy **zamykaniu** obwodu lub **wzmaganiu** się prądu. Wogóle siła elektromotoryczna samoindukcji przeciwdziała tym zmianom, które ją wywołują. Wszystkie czynniki, zwiększające strumień magnetyczny, wywołany przez prąd, powiększają siłę elektromotoryczną samoindukcji, a więc np. zwiększenie liczby zwojów w zwojnicach, a także umieszczenie wewnątrz zwojnic rdzeni żelaznych.



Rys. 42.

Przy dużej liczbie zwojów w zwojnicach siła elektromotoryczna samoindukcji może **wielokrotnie** przewyższać siłę elektromotoryczną źródła prądu. Skutkiem tego, przy przerywaniu obwodów z wielką samoindukcją, między kontaktami przerywacza pod wpływem bardzo znacznego napięcia powstaje silna iskra i prąd płynie dalej przez parę metalu, tworzącą się z roztopionych cząstek kontaktów. Wtedy mamy wrażenie, że pomiędzy kontaktami widzimy płomień.

Zjawisko takie nazywamy **łukiem Volty*)**. Łuk ten nisz

*) Czytaj: Wolty.

czy kontakty przerywacza i może wywołać pożar, ponieważ jest bardzo gorący.

Wysokie napięcie, wywołane przez samoindukcję w drutach izolowanych, może przebić izolację prądem i uszkodzić ją znacznie.

Gdy w obwodzie z samoindukcją przepływa prąd zmienny, to siła elektromotoryczna samoindukcji, przeciwdziałając zmianom prądu, osłabia go i w ten sposób samoindukcja stanowi tu rodzaj oporu.

Samoindukcję można **zmniejszyć, zmniejszając prędkość zmiany prądu, lub też wielkość strumienia magnetycznego, wywołanego przez prąd.**

Gdy nawijamy przewodnik na szpulkę, nie w celu wywołania strumienia magnetycznego, a tylko chcąc zaoszczędzić miejsce, to dla zmniejszenia samoindukcji stosujemy tak zwane bifilarne czyli dwunitkowe nawinięcie. Sposób takiego nawijania wskazany jest na rys. 43. Drut izolowany skła-



Rys. 43.

damy we dwoje i nawijamy dwa druty razem. Przy takim nawijaniu we wszystkich zwojach obok siebie znajdują się przewodniki, po których prąd płynie w kierunkach przeciwnych.

Prądy przeciwne wytwarzają tu strumienie magnetyczne w kierunkach przeciwnych; te strumienie magnetyczne znoszą się prawie zupełnie, więc taka cewka prawie nie ma samoindukcji.

Zdolność obwodu elektrycznego do wytwarzania siły elektromotorycznej samoindukcji, określa się tak zwaną **indukcyjnością**, którą mierzymy w **henrach** (skrót H).

Indukcyjność **jeden henr** posiada taki obwód, w którym powstaje siła elektromotoryczna **jeden wolt** przy zmianie prądu o **jeden amper** w ciągu **jednej sekundy**.

Znając indukcyjność obwodu i prędkość zmiany prądu, możemy obliczyć siłę elektromotoryczną samoindukcji.

Oznaczmy przez I_1 natężenie prądu w pewnej chwili, przez I_2 natężenie prądu po upływie czasu t , a indukcyjność obwodu przez L , to średnią siłę elektromotoryczną samoindukcji znajdziemy według wzoru:

$$E = -L \cdot \frac{I_2 - I_1}{t}$$

Indukcyjność obwodu
średnia siła elektromotoryczna
stała elektromotoryczna samoindukcji

Znak minus oznacza, że jeżeli $I_2 > I_1$, czyli prąd rośnie, to siła elektromotoryczna samoindukcji jest skierowana wbrew prądowi.

Przykład. Indukcyjność pewnego obwodu wynosi 2 henry, prąd z początku jest 0,5 A, a po upływie 0,01 sekundy wzrósł do 10,5 A.

Mamy obliczyć średnią siłę elektromotoryczną samoindukcji.

Tu:

$$I_2 = 10,5 \text{ A}; I_1 = 0,5 \text{ A},$$

więc:

$$E = -2 \cdot \frac{10,5 - 0,5}{0,01} = -2000 \text{ woltów}.$$

Z tego przykładu wyraźnie widzimy, że siła elektromotoryczna samoindukcji jest tem większa, im większa jest indukcyjność obwodu, a także im prędzej wzrasta lub słabnie prąd.

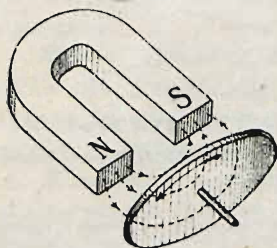
24. Prądy wirowe.

Na szczególną uwagę zasługują jeszcze prądy elektryczne indukcyjne, powstające nie w drutach, lecz w kawałkach metalu różnych kształtów, poruszających się w pobliżu magnesów, lub znajdujących się w zmiennym strumieniu magnetycznym.

Prądy takie, nazywają się prądami wirowymi, albo prądami Foucault'a*). Rozważmy dwa przykłady. Na rys. 44 mamy

*) Czytaj: Fukolta.

w pobliżu magnesu stalowego krążek miedziany, obracający się szybko w kierunku strzałki. Krążek ten przecina linie magnetyczne, wybiegające z magnesu, i skutkiem tego powstaje

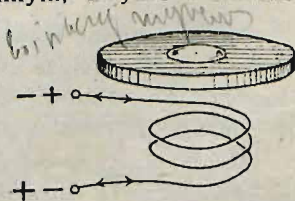


Rys. 44.

w nim siła elektromotoryczna indukcji, wywołująca wewnątrz krążka prądy elektryczne. Według prawa Lenz'a działanie biegunów magnesu na przewodniki z prądem indukcyjnym, stara się zatrzymać ruch tych przewodników, to też magnes hamuje ruch obrotowy miedzianego krążka.

Inny przykład mamy na rys.

45. Tutaj nad nieruchomą zwojnicą znajduje się nieruchomy krążek miedziany. Przez druty zwojnicy przepuszczamy prąd dość szybko zmienny, np. zmieniający kierunek 100 razy w ciągu sekundy. Taki prąd wytwarza ~~zmienny strumień magnetyczny~~, którego linie przecinają krążek miedziany i w ten sposób wywołują w tym krążku prądy indukcyjne. Kierunek tych prądów jest taki, że prąd zwojnicy odpycha krążek do góry. Podobne prądy wirowe powstają również w rdzeniu żelaznym elektromagnesu, zasilanego prądem zmiennym. Jeżeli rdzeń stanowi jednolity kawałek żelaza, to prądy te są bardzo silne; rozgrzewają one żelazo i znacznie osłabiają strumień magnetyczny elektromagnesu. Taki elektromagnes przyciąga kotwicę słabo. W celu zmniejszenia natężenia tych prądów wirowych, robimy rdzenie elektromagnesów, zasilanych prądem zmiennym, zwykle z cienkich blaszek żelaznych, izolowanych pomiędzy sobą, ustawionych wzdłuż linii magnetycznych, a czasem z odcińków drutu żelaznego.



Prądy wirowe powstają nawet w przewodach, prowadzących prądy zmienne. Tu powodują one osłabienie prądu w środku przewodu i

Rys. 45.

wzmożenie się w pobliżu powierzchni. Jest to tak zwane zjawisko **naskórkowe**. Dla dobrego zrozumienia tego zjawiska wystawmy sobie, że w grubym przewodzie mamy 500 amperów prądu; gdy prąd jest stały, to w środku przekroju przepływa przez jeden milimetr kwadratowy 1 amper prądu i przy brzegach tak samo; jeżeli zaś prąd będzie dość szybko zmienny, to w środku przepłynie przez jeden milimetr kwadratowy $\frac{1}{2}$ ampera, a przy brzegach $1\frac{1}{2}$ ampera prądu.

W celu lepszego wyzyskania przewodów grubych przy prądzie zmiennym wykonywamy je nieraz w postaci rur lub kilku cienkich szyn, ułożonych obok siebie i unikamy całkiem stosowania przewodów żelaznych, w których siły magnetyczne, wywołujące indukcję, są większe niż w miedzianych.

Przy prądach bardzo szybkozmiennych, stosowanych w radjotelegrafji, wszystkie prawie przewody sporządzamy z rurek, tasemek i odpowiednio plecionych kabelków, w których znosi się wzajemna indukcja prądów poszczególnych drucików.

25. Straty energii w żelazie skutkiem przemagnesowywania.

Powyżej omawiane własności żelaza przy przemagnesowywaniu wywołują bardzo ważne w elektrotechnice straty energii na ciepło w żelazie.

Gdy mówiliśmy o magnesowaniu żelaza i sporządzaniu magnesów stałych, zwróciliśmy uwagę na zdolność żelaza zachowywania magnetyzmu szczątkowego. Otóż cenna ta własność, gdy chodzi o sporządzanie magnesów stałych, staje się szkodliwą, gdy żelazo w maszynach ulega stałemu przemagnesowywaniu. Wtedy na zniesienie szczątkowego magnetyzmu potrzebna jest praca, która zamienia się wewnątrz żelaza na ciepło. Ciepło to nazywamy ciepłem histerezy, gdyż histereza jest przyczyną jego wywiązywania się. Pozatem, jak widzieliśmy w poprzednim rozdziale, przy przemagnesowywaniu że-

laza, mamy w nim zmienny strumień magnetyczny, który wywołuje prądy wirowe.

Stosując rdzenie żelazne z blaszek, znakomicie osłabiamy prądy wirowe, ale mimo to, wskutek tych prądów, w żelazie wywiązuje się ciepło, powstające kosztem energii dostarczonej przez źródło prądu, połączone ze zwojnicą magnesującą.

W celu zmniejszenia strat przez histerezę, żelazo, ulegające przemagnesowywaniu, powinno być miękkie, gdyż ono ma mniejszą histerezę.

W celu zmniejszenia strat na prądy wirowe, cienkie blaszki żelazne sporządzamy z żelaza nakrzemionego, (zawierającego niewielką domieszkę krzemu); w takim żelazie powstają mniejsze prądy wirowe.

Gatunek żelaza oceniamy podług mocy straconej na ciepło, wywiązujące się w żelazie skutkiem histerezy i prądów wirowych przy określonej gęstości linii magnetycznych. Dla przykładu podajemy straty w watach na jeden kilogram wagi rozmaitych gatunków blachy, używanej do budowy maszyn elektrycznych, przy magnesowaniu prądem zmiennych, który 100 razy na sekundę zmienia kierunek. B — gęstość linii magnetycznych, d — grubość blachy w mm.

B maximum (największe)	Zwykła blacha do dynamaszyn.		Blacha słabo nakrzemiona	Blacha na- krzemiona
	$d = 0,5 \text{ mm}$	$d = 0,35 \text{ mm}$	$d = 0,5 \text{ mm}$	$d = 0,35 \text{ mm}$
3 000	0,5	0,35	0,4	0,2
7 000	1,8	1,35	1,55	0,7
10 000	3,3	2,58	2,9	1,36
12 000	4,6	3,75	4,15	2,00
14 000	6,15	5,63	5,90	2,75
15 000	7,10	6,40	6,96	3,50

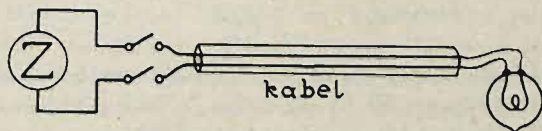
Jako najbardziej charakterystyczne, uważamy zawsze straty przy 10000 linii magnetycznych na cm^2 . Tak na przykład zwykła blacha do dynamaszyn, grubości 0,5 mm, wy-

kazuje wtedy straty 3,3 wata na 1 kg. Blacha zwykła, używana do krycia dachów, ma w tych warunkach straty wielokrotnie większe.

26. Pojemność.

W obwodach elektrycznych znane są jeszcze zjawiska, zachodzące na skutek własności zwanej **pojemnością**.

Znaczną pojemność mają przewody elektryczne prowadzone pod ziemią w postaci tak zwanych kabli*) rys. 46. To też szczególnie kable mają tę własność, że gdy zamknie-



Rys. 46.

my przerywacze łączące lampę ze źródłem prądu to zanim zacznie przepływać przez lampę prąd stały, znaczne ładunki elektryczne skupiają się na drutach w kablu**). Ładunki te przesuwają źródło prądu i to wywołuje w drutach pomiędzy źródłem prądu i kablem t. zw. chwilowy prąd ładowania czyli prąd pojemnościowy.

Zdolność obwodu do ładowania się elektrycznością przed ustaleniem się prądu nazywamy **pojemnością**. Własność pojemności mają w pewnej mierze wszystkie obwody elektryczne. Przy zmiennym napięciu źródła prądu ciągle się odbywa przesuwanie elektryczności ładującej przewody i ciągle płynie zmienny prąd pojemnościowy. Przy prądzie zmiennym, nawet wtedy gdy wszystkie odbiorniki są odłączone, a więc w obwodzie **przerwanym**, odbywa się jednak przesuwanie ładunków elektrycznych po przewodach tam i z powrotem.

*) Patrz dalej przewody.

**) Jak woda napełnia wprzód rurę, zanim po tej rurze popłynie dalej.

Pojemność mierzymy w jednostkach zwanych **faradami** (skrót F.) jest to jednak jednostka duża i z tego powodu posługujemy się najczęściej jednostkami milion razy mniejszemi, które nazywamy **mikrofaradami** (skrót — μF). Jeden farad pojemności ma taki podwójny przewód, który przy wzroście napięcia pomiędzy przewodami o jeden wolt w ciągu sekundy bierze prąd ładujący — jeden amper.

Wielkość prądu ładującego możemy obliczyć. Pojemność oznaczamy przez C , początkowe napięcie między przewodami, przez V_1 napięcie po upływie t sekund, przez V_2 średni prąd ładujący przez I , wtedy:

$$I = C \frac{V_2 - V_1}{t}.$$

Przykład. Mamy kabel, którego pojemność wynosi $1,2 \mu F$, napięcie początkowe $50 V$, po upływie $0,01$ sekundy wzrosło do $5050 V$. Mamy obliczyć średni prąd ładujący.

W naszym przykładzie:

$$C = 1,2 \mu F = 1,2 \cdot 10^{-6} F, \quad V_2 = 5050; \text{ a } V_1 = 50 \text{ woltów.}$$

więc:

$$I = 1,2 \times 10^{-6} \times \frac{5050 - 50}{0,01} = 0,6 \text{ ampera.}$$

Z tego przykładu widzimy, że prąd ładujący rośnie wraz z pojemnością i z szybkością wzrostu napięcia.