

52
BIBLIOTEKA ŻOŁNIERSKA
PODRECZNIKI DLA DOKSZTAŁCAJĄCYCH SZKOŁ ZAWODOWYCH
NR 8

JERZY BORKOWSKI I JERZY BUCZKIEWICZ

PODSTAWY ELEKTROTECHNIKI

Wydanie drugie



WSZECHŚWIATOWY KOMITET
ZWIĄZKÓW MŁODZIEŻY
CHRZEŚCIJAŃSKIEJ W GENEWIE
S Z W A J C A R I A

Pod redakcją Komitetu Kulturalno-Oświatowego 2. DSP, nakładem YMCA i drukiem pisma żołnierzy polskich internowanych w Szwajcarii „Goniec Obozowy“, ukazały się dotąd następujące wydawnictwa:

I. PODRĘCZNIKI DLA ŻOŁNIERSKICH SZKÓŁ POWSZECHNYCH

- Nr 1. Bronisław LISTWAN, Wypisy polskie, str. 300 i 8 tabl.
- Nr 2. Adam SANOCKI, Dzieje Polski w zwięzłym zarysie str. 266 + XII i 16 tabl
- Nr 3. Inż. Bohdan JASTRZĘBIEC, Chemia, str. 40 i 13 rys. w tekście
- Nr 4. Krzysztof GRODECKI, Geografia, str. 354, Mapa Polski i 249 rys. w tekście
- Nr 5. Ignacy J. KLIMASZEWSKI, Rachunki, str. 268 i 161 rys.
- Nr 6. J. ŁODYGO i F. NADWÓRNIAK, Przyroda, str. 122 i 53 rys.
- Nr 7. L. EBERMAN i T. WRÓBLEWSKI, Fizyka, str. 60 i 80 rys.
- Nr 8. Adam BRZOZA, Państwo i obywatel, str. 84
- Nr 9. Dr Karol MITKIEWICZ, Nauka o zdrowiu, str. 84 i 65 rys.

II. PODRĘCZNIKI DLA DOKSZTAŁCAJĄCYCH SZKÓŁ ZAWODOWYCH

- Nr 1. Mgr Wincenty WOJTKIEWICZ. Materiałoznawstwo ogólne, str. 126 i 5 rys. w tekście
- Nr 2. Inż. Antoni BUKOWIECKI, Metaloznawstwo, str. 63 + III i 34 rys. w tekście
- Nr 3. Tng Kazimierz DONIMIRSKI, Kuźnictwo, str. 39 + III i 16 tablic z 101 rys.
- Nr 4. Mirosław MOSIŃSKI, Obróbka cieplna metali, str. 43 + III, 11 tabel i 13 tablic z 53 rys.
- Nr 5. Inż. Zbigniew KOPCZYŃSKI, Odlewnictwo, str. 32 z 33 rys. w tekście
- Nr 6. Inż. Antoni MICHALIK, Obróbka metali przez skrawanie, str. 129 + VII, 5 tabel i 56 tablic z 256 rys.
- Nr 7. Inż. Stanisław KUBASZEWSKI, Instalacje elektryczne, str. 141 + III, 61 tablic z 280 rys.
- Nr 8. Jerzy BORKOWSKI i Jerzy BUCZKIEWICZ, Podstawy elektrotechniki, str. 161 + 6 tabel i atlas (56 tablic) z 214 rys.
- Nr 9. Marcin PRUGAR i Andrzej OLSZOWSKI, Stolarstwo, str. 122 i atlas (60 tablic) z 222 rys.
- Nr 10. Inż. Maciej MISCHKE, Budownictwo wodne, str. 38 + IV i 44 tablic z 82 rys.
- Nr 11. Inż. Czesław KAMELA, Miernictwo, str. 117 + II i atlas (77 tablic) z 229 rys.
- Nr 12. Inż. Mieczysław SWIBA, Roboty ziemne, str. 128 + IV i atlas (41 tabl. z 132 rys.).
- Nr 13. Inż. Rudolf MOLISZ, Budowa i utrzymanie dróg, str. 181 + III + 2 tabele i atlas (53 tablice) ze 170 rys.

III. ŻOŁNIERSKIE KURSY POCZĄTKOWE

- Nr 1. St. SERB i J. ŚLĄSKI, Podręcznik do nauki czytania i pisanja, str. 99.

Nadto nakładem YMCA i drukiem pisma „Goniec Obozowy“:

IV. PRZYJACIEL OBOZOWY

- Nr 1. Wypisy, część I-III (str. 123) i część IV-VIII (str. 173). Wydawnictwo przeznaczone dla Polaków, przebywających w obozach jenieckich.
- Nr 2. Inż. Stanisław JARZĘBIŃSKI, Silniki spalinowe na paliwo płynne i gazowe oraz urządzenia w pojazdach mechanicznych, str. 433 + VIII z 125 rys. i 1 tablicą barwną.

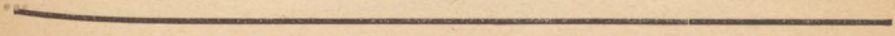
147912

DOM OZDROWIENCOW
CANCELLED

JERZY BORKOWSKI I JERZY BUCZKIEWICZ

PODSTAWY ELEKTROTECHNIKI

Wydanie drugie



Pod redakcją Komitetu Kulturalno-Oświatowego 2 DSP.
Drukarnia Vogt-Schild A. G. Solothurn
Kierownictwo techniczne: „Goniec Obozowy“
Pismo polskich żołnierzy internowanych

PODRĘCZNIK DLA ELEKTROMONTERÓW I RADIOTECHNIKÓW

Wydanie drugie



724 777

Copyright:
WORLD'S ALLIANCE OF THE
YOUNG MEN'S CHRISTIAN ASSOCIATION
(Y. M. C. A.)
Geneva 1945

Printed in Switzerland

Dr 22/93

W S T Ę P

Energia. Od początku swego istnienia dążył człowiek do wyręczenia się siłami przyrody, celem zmniejszenia własnego wysiłku i uzyskania lepszych wyników swej pracy. W przyrodzie bowiem pod najrozmaitszymi postaciami istnieje energia czyli zdolność wykonywania pracy.

Trzeba ją tylko umieć ujarzmić i odpowiednio nią pokierować, aby stała się użyteczną dla ludzkości. Energię posiada wiatr; ujarzmlona przez ludzi na skrzydłach wiatraka jest wykorzystana do pracy kół młyńskich. Energię zawierają masy wód spływające z naturalnych lub sztucznych wodospadów; zniewolona i odpowiednio ujęta przez ludzi porusza turbiny lub młyny wodne.

Olbrzymie ilości energii drzemią w przyrodzie w złożach węgla kamiennego. W czasie spalania węgla energia ta wydziela się na zewnątrz pod postacią ciepła. Ciepła energia ogrzewając wodę w kotłach parowych przeobraża się w ciśnienie pary wprawiającej w ruch tłoki cylindrów maszyny parowej. A maszyna parowa wykonuje rozmaite prace (np. w lokomotywie ciągnącej naładowane wagony). Energię zawartą w paliwach płynnych (nafta, benzyna), która w chwili ich spalania wyzwala się w postaci ciśnienia gazów, wykorzystał człowiek w pracy silnika spalinywego (np. w samochodzie).

Prawo zachowania energii. Pozornie zdawałoby się, że energia zawarta w masie spadających wód poruszających turbinę, powstaje z niczego. Tak jednak nie jest. Obserwując dokładnie przebieg całego zjawiska, jak to przedstawia rys. 1, widzimy, że zasadniczym źródłem energii jest słońce. Pod wpływem ciepłej energii słońca, parują z powierzchni mórz, jezior i rzek cząsteczki wody i unosząc się w górę w postaci pary, tworzą obłoki i chmury. Dostawszy się do zimnej strefy, skraplają się i w postaci deszczu, zasilając strumienie i rzeki, napełniają wodą jeziora (rys. 1).

Masy wód, spływając z górnego jeziora poprzez rurociągi na łopatki turbiny, obracają ją, oddając energię w formie użytecznej pracy maszyn. Tak więc ciepła energia słońca, przemieniona w energię spadających wód, zostaje wykorzystana w pracy maszyn.

Ciepła energia dostarczana przez słońce może być przedstawiona obrazowo w formie pracy pompy potrzebnej do przepompowywania wody z dolnego jeziora w górne.

Praca, którą należy włożyć w przepompowywanie wody, będzie większa niż praca jaką zdolne będą wykonywać maszyny poruszane tur-

binami. Dzieje się to na skutek strat, występujących na drodze obiegu, które należy pokonać jak np. tarcie wody w rurkach, tarcie osi kół w łożyskach itd. Część więc włożonej energii jest dla danej pracy bezpowrotnie stracona. Nie ginie jednak ona bez śladu, gdyż zamienia się na energię cieplną, wydzielającą się przy tarcu wody o ścianki rur i osi o łożyska.

Przy wszelkich przekształceniach i przemianach energii (względnie przy jej przesyłaniu na odległość) straty takie zawsze występują i są nie do uniknięcia.

Zasadniczym prawem przyrody jest, że energia nie może powstać z niczego, jak również i zginąć bez śladu, a może się jedynie w inne rodzaje energii przekształcić.

Energia elektryczna i jej źródła. Rodzajem energii, dogodnej w użyciu, łatwej do przesyłania na odległość a zdolnej wykonywać najrozmaitsze prace, jest energia elektryczna. Jak każdy rodzaj energii, energia elektryczna nie może powstać z niczego. Dostarczają ją urządzenia zwane źródłami energii elektrycznej. Znamy trzy zasadnicze sposoby otrzymywania energii elektrycznej, a mianowicie na drodze:

- a) mechanicznej,
- b) chemicznej,
- c) cieplnej.

Do zastosowania praktycznego najczęściej wytwarzamy energię elektryczną na drodze mechanicznej, to znaczy przez przemianę energii mechanicznej w elektryczną.

Na drodze chemicznej lub cieplnej otrzymujemy tak niewielkie ilości energii elektrycznej, że korzystamy z niej jedynie w specjalnych wypadkach (np. baterijka lampki kieszonkowej).

W dalszych rozdziałach omówimy szczegółowo zasady tych przemian. Tu wystarczy zaznaczyć, że przetwarzanie energii mechanicznej na elektryczną następuje w prądnicach. Potrzebną do tego celu energię mechaniczną czerpiemy wyzyskując siły przyrody jak spadki wód, pęd powietrza lub energię zawartą w paliwie. Stąd rozróżniamy elektrownie wodne, powietrzne, cieplne.

Wydzielanie się energii elektrycznej na drodze chemicznej następuje w ogniwach i bateriach na skutek zachodzących w nich reakcji chemicznych.

Przemiana ciepła w energię elektryczną zachodzi w tzw. termoelementach. Na tej drodze otrzymujemy wprawdzie nieznaczną energię elektryczną, jednak wystarcza ona dla oddania ogromnych usług w pewnych specjalnych celach (np. pomiary).

Cztery działania prądu elektrycznego, Człowiek nie posiada specjalnego zmysłu, za pomocą którego wyczuwałby elektryczność. Istnienie jej stwierdzamy jedynie na skutek wywołanych przez nią zjawisk i działań dostępnych naszym zmysłom. Zjawiska te są wynikiem przekształcania się energii elektrycznej w inne rodzaje energii. Rozróżniamy cztery zasadnicze działania prądu elektrycznego (rys. 2):

- a) Ciepłne: Ogrzewanie przewodników na drodze przepływu prądu elektrycznego;
- b) Chemiczne: Rozkład ciał płynnych;
- c) Magnetyczne: Odchylenie się igły magnetycznej w sąsiedztwie przewodnika z prądem (a więc działanie magnetyczne prądu daje skutek mechaniczny);
- d) Światłne: Jarzenie cząsteczek rozrzedzonych gazów.

Odpowiednio do czterech powyższych działań prądu elektrycznego, wykorzystujemy energię elektryczną w następujących urządzeniach:

- a) Grzejniki elektryczne, żarówkowe oświetlenie elektryczne, ciepłe przyrządy pomiarowe, bezpieczniki topikowe.
- b) Elektroliza, galwanizacja, chromowanie, niklowanie, posrebrzanie, otrzymywanie czystej miedzi i czystego aluminium drogą elektrolizy.
- c) Elektromagnesy, dzwonki elektryczne, przyrządy pomiarowe, silniki elektryczne, poszczególne urządzenia telegrafu, radia, telefonu.
- d) Zimne światło elektryczne: neony, lampki sygnalizacyjne.

Podział elektrotechniki. W związku z olbrzymim rozwojem elektrotechniki w ostatnich dziesiątkach lat i szerokim jej zastosowaniem w najrozmaitszych dziedzinach życia praktycznego, nauka o elektryczności stała się bardzo obszernym działem techniki. Stąd to wyłoniła się konieczność podziału elektrotechniki na więcej działów specjalnych. Obecnie naukę elektrotechniki dzielimy na dwa zasadnicze działy:

- a) elektrotechnika prądów silnych,
- b) elektrotechnika prądów słabych.

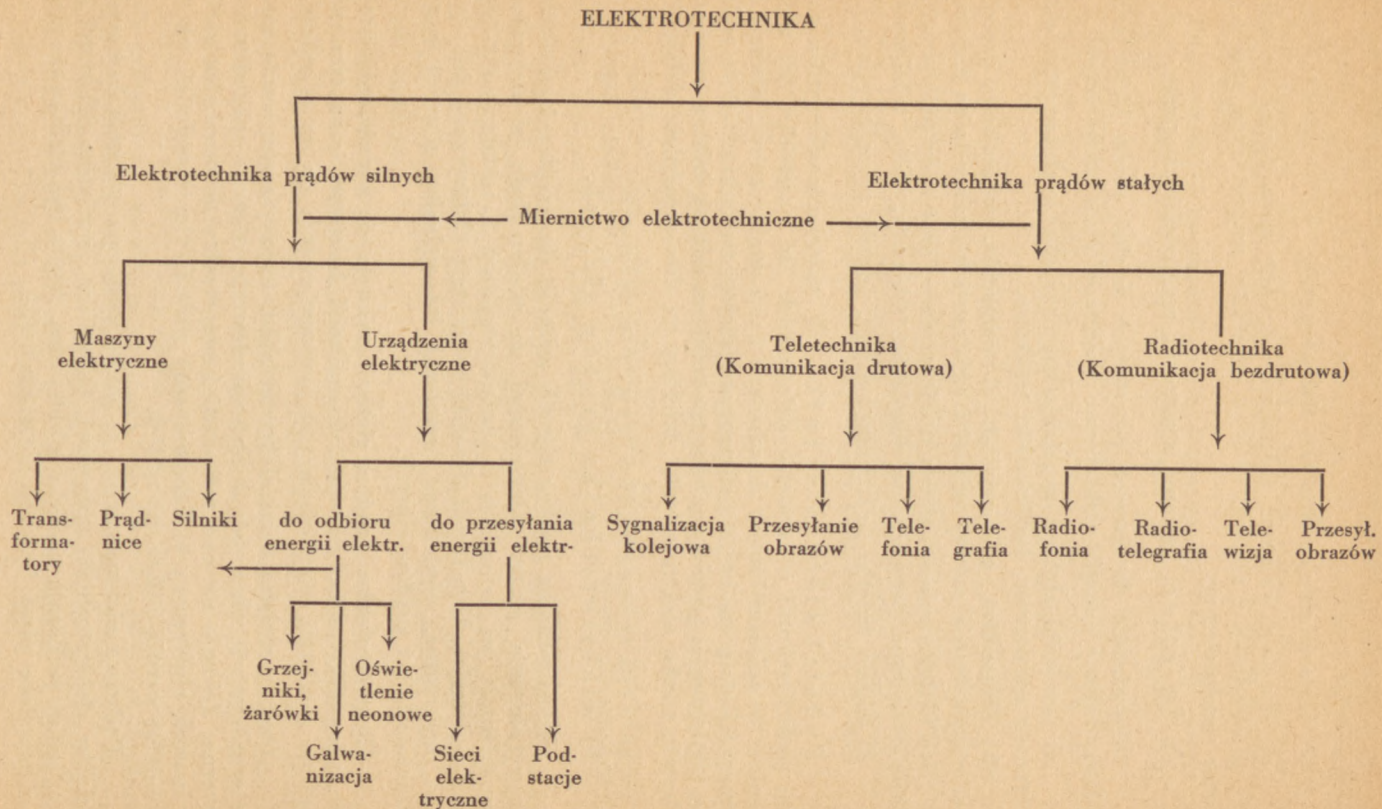
Elektrotechnika prądów silnych zajmuje się urządzeniami służącymi do wytwarzania energii elektrycznej na wielką skalę (elektrownie), jej przesyłaniem na odległość i rozdziałem (sieci i instalacje elektryczne oraz podstacje). Urządzenia do odbioru energii elektrycznej jak np. silniki elektryczne, oświetlenie, grzejniki itd. wchodzi również w zakres elektrotechniki prądów silnych.

Elektrotechnika prądów słabych zajmuje się zagadnieniami telefonii, telegrafii, radia, telewizji, sygnalizacji kolejowej, a za tym mówiąc ogólnie środkami umożliwiającymi porozumiewanie się na odległość.

Osobny niejako dział elektrotechniki, mający zastosowanie zarówno w urządzeniach silno- jak i słabo-prądowych, stanowi miernictwo elektryczne. Zajmuje się ono metodami i przyrządami do pomiarów wielkości jednostek elektrycznych. Schematyczny podział elektrotechniki na działy specjalne podaje załączona tablica.

Podstawy elektrotechniki są jakby wspólnym wstępem do wszystkich działów elektrotechniki specjalnej. Omawiane zasadnicze własności i prawa, jakim podlegają zjawiska elektryczne, muszą być gruntownie poznane i zrozumiane przez każdego elektrotechnika.

SCHEMATYCZNY PODZIAŁ ELEKTROTECHNIKI



ROZDZIAŁ I

PODSTAWOWE POJĘCIA ELEKTROTECHNIKI

Wiemy, że aby doprowadzić prąd elektryczny z ściennego kontaktu elektrycznego np. do lampy stojącej na stole, musimy sznur czyli przewód lampy wetknąć do kontaktu. Przewód ten składa się z drutu (najczęściej miedzianego) w izolacji gumowej, owiniętej bawełną. Zdajemy sobie sprawę, że metalowy drut jest właściwym przewodem doprowadzającym prąd elektryczny z kontaktu do naszego odbiornika energii elektrycznej, w tym wypadku do lampy, zaś guma i bawełna izoluje, czyli chroni nas przed możliwością dotknięcia gołego drutu i porażenia prądem elektrycznym. Aby zrozumieć istotę zjawiska, dlaczego metale przewodzą prąd elektryczny, zaś guma czy bawełna stanowi zaporę nieprzepuszczającą prądu, musimy choć ogólnie zapoznać się z budową materii.

Atom. Wszystkie ciała stałe, płynne i gazowe zbudowane są z drobniutkich cząstek zwanych atomami.

Jak drobny jest atom i jak mała jest jego waga możemy sobie wyobrazić przez porównanie ciężaru atomu do ciężaru 1 grama. Otóż ten stosunek przy najlżejszym atomie jakim jest wodór tak się przedstawia jak ciężar i wielkość odważnika kilograma do całej masy kuli ziemskiej. Poszczególne atomy składają się z jądra i krążących wokół niego elektronów. Masa elektronu jest jeszcze około 1800 razy mniejsza od masy atomu. Charakter budowy jądra i ilość krążących wokół niego elektronów stanowi o tym, czy mamy do czynienia z atomem wodoru czy też żelaza, węgla lub innego pierwiastka chemicznego.

Elektron. Elektrony krążące wokół jądra atomu, na wzór planet wokół słońca, są najdrobniejszymi cząstkami ujemnej elektryczności. (Rys. 3).

Elektron posiada ściśle określoną średnicę (10^{-13} cm) i masę (10^{-27} gr).

Podczas gdy elektron jest elektrycznością ujemną, jądro atomu posiada charakter elektryczności dodatniej.

W atomie stosunek elektronów jako ujemnej elektryczności do dodatniej elektryczności jest taki, że oddziaływanie ich się znosi i atom jest elektrycznie obojętny tzn. zewnątrznie nie posiada charakteru ani elektryczności dodatniej ani też ujemnej.

Elektrony związane. Elektrony przynależne do atomu, stanowiące o jego budowie i krążące wokół jądra, nazywamy elektronami związanymi.

Elektrony wolne. Każde ciało oprócz elektronów związanych, przynależnych do atomu, posiada elektrony wolne, które poruszają się

pomiedzy atomami w rozmaitych kierunkach. Te wolne elektrony istnieja zarowno wewnatrz jak i na powierzchni ciała.

Ciała elektrycznie obojętne. Jeśli wolne elektrony są w jakimś ciele równomiernie i równie gęsto rozłożone jak w jego otoczeniu, stan tego ciała określamy jako elektrycznie obojętne, mówimy że ciało jest nienaektryzowane.

Ciała naładowane ujemnie lub dodatnio. Elektrony, czyli ujemne cząsteczki elektryczności, posiadają tę charakterystyczną właściwość, że się nawzajem od siebie odpychają, starając się od siebie oddalić. Również dwa ciała naektryzowane ujemnie, jako te które posiadają nadmiar elektronów, odpychają się (rys. 4 a), natomiast ciała, z których jedno posiada nadmiar elektronów (ujemne), a drugie jest w elektrony ubogie (dodatnie), przyciągają się wzajemnie (rys. 4 b).

Ujmując ogólnie tę właściwość stwierdzamy, że: jednoimiennie (oba dodatnio lub oba ujemnie) naładowane ciała odpychają się, zaś różnoimiennie (jedno dodatnio a drugie ujemnie) naładowane ciała przyciągają się do siebie.

Prąd elektryczny. Jeśli dwa ciała, z których jedno naładowane jest ujemnie a drugie dodatnio, połączymy z sobą metalowym przewodem, wówczas elektrony z ciała posiadającego ich nadmiar (—) popłyną do ciała ubogiego w elektrony (+) (rys. 5).

Przepływ elektronów trwać będzie tak długo aż się ustali stan równowagi elektrycznej pomiędzy obu ciałami, to znaczy dopóki nie zrówna się gęstość elektronów w obu ciałach.

Przepływ wolnych elektronów nazywamy prądem elektrycznym. Jakkolwiek elektrony płyną od ciała naładowanego ujemnie (—) do ciała naładowanego dodatnio (+) to za kierunek przepływu prądu elektrycznego umówiono się uważać kierunek odwrotny, od (+) do (—). Wielkość czyli natężenie prądu elektrycznego jest większe lub mniejsze, zależnie od tego ile elektronów przepływa w czasie 1 sekundy przez przekrój przewodu.

Coulomb. W praktyce mamy do czynienia z bardzo dużymi ilościami elektronów. Aby nie być zmuszonym operować liczbami olbrzymimi, przyjęto ilość $6,4 \cdot 10^{18}$ elektronów nazywać ładunkiem elektrycznym 1 Coulomba.

Ampere. Wielkość natężenia prądu elektrycznego powstałego przy przepływie 1 Coulomba elektronów w czasie 1 sekundy nazwano 1 Amperem. W skróceniu oznacza się go literą: A. W elektrotechnice ma się nieraz do czynienia z bardzo małymi natężeniami prądów (np. w radio i teletechnice). Wprowadzono więc, dla wygody, jednostki mniejsze od 1 ampera, a mianowicie:

$$\text{miliamper (mA) } 1 \text{ mA} = \frac{1}{1000} \text{ A}$$

$$\text{mikroamper (}\mu\text{A) } 1 \mu\text{A} = \frac{1}{1000} \text{ mA} = \frac{1}{1000000} \text{ A}$$

Natężenie prądu przyjęto oznaczać literą J.

Aby zdać sobie sprawę z wielkości prądów elektrycznych w praktyce spotykanych, można ogólnie powiedzieć, że żarówki oświetleniowe w mieszkaniach zużywają części ampera, piecyki, żelazka, kuchenki elektryczne pobierają prąd paru amperów, tramwaj miejski zasilany jest prądem rzędu 100 A, zaś szybkie kolej elektryczna kilkuset amperami. Jeśli chodzi zaś o prądy bardzo małe, to wystarczy nadmienić, że człowiek „czuje, że go prąd złapał“ już przy prądach mniejszych od 1 mA, zaś w słuchawce telefonicznej prądy rzędu 0,01 mA czyli 10^{-5} A, powodują, że „już coś słyhać“.

Napięcie. Powód przepływu elektronów pomiędzy dwoma różnoimiennie naładowanymi ciałami połączonymi przewodem, da się łatwo wytłumaczyć. Jest nim z jednej strony ciśnienie odpychających się elektronów, znajdujących się w nadmiarze w ujemnie naładowanym ciele, z drugiej strony jest nim jakby ssące działanie ubogiego w elektrony, dodatnio naładowanego ciała. Zdajemy sobie jasno sprawę z tego, że w rezultacie wielkość tego ssąco-cisnącego działania zależna jest od tego, jak duży jest nadmiar elektronów w ciele ujemnym, oraz do jakiego stopnia ciało dodatnie jest ubogie w elektrony.

Obserwując rys. 6a i 6b, wyczuwamy odrazu, że w wypadku a, dzięki dużej różnicy między gęstością elektronów w obu ciałach, strumień przepływających elektronów będzie większy niż w wypadku b, gdzie różnica w zawartości elektronów w obu ciałach jest bardzo nieznaczna. To ssąco-cisnące działanie, występujące pomiędzy różnoimiennie naładowanymi ciałami a wpływające na wielkość prądu elektrycznego, nazywamy napięciem elektrycznym. W wypadku a, napięcie elektryczne pomiędzy obu ciałami jest większe niż w wypadku b.

Wolt. Jednostką napięcia elektrycznego jest Wolt. W skróceniu oznacza się: V. W wypadku konieczności zastosowania jednostek mniejszych lub większych stosuje się następujące:

$$\text{miliwolt (mV)} \quad 1 \text{ mV} = \frac{1}{1000} \text{ V}$$

$$\text{mikrowolt (\mu V)} \quad 1 \text{ V} = \frac{1}{1000} \text{ mV} = \frac{1}{1000000} \text{ V}$$

$$\text{kilowolt (kV)} \quad 1 \text{ kV} = 1000 \text{ V}$$

Napięcie przyjęto oznaczać literą: U

O wielkościach napięć spotykanych w praktyce dadzą nam pojęcie następujące dane: napięcie w odbiorczej antenie radiowej, które nowoczesne odbiorniki radiowe są zdolne jeszcze uchwycić, są rzędu paru μV . Napięcie płaskiej bateryjki kieszonkowej wynosi 4,5 V. Znormalizowane napięcie sieci oświetleniowych jest 110 lub 220 V. Tramwaje elektryczne są zasilane z sieci o napięciu paruset, a kolej elektryczna paru tysięcy wolt. Linje przemysłowe wysokiego napięcia pracują przy 6, 15, 30, 100 i 200 kV. Najwyższe w technice osiągnięte napięcie jest rzędu

3000 kV czyli 3 milionów woltów. Napięcia w czasie wyładowań pioruna dochodzą do rzędu kilkudziesięciu milionów wolt.

Oporność. Prąd elektryczny czyli przepływ wolnych elektronów przez przewód możemy porównać z przepływem wody przez rurę. Jeśli wodę płynącą początkowo otwartym korytem skierujemy do rury, to ilość wody przepływającej na sekundę przez przekrój rury, znacznie się zmniejszy i to w zależności od jej wymiarów. Przyczyną tego jest opór, który stawia rura przepływającym cząsteczkom wody. Opór ten zależy od trzech czynników: od średnicy, od długości oraz od stanu powierzchni wewnętrznych ścianek rury. Im krótsza będzie rura, tym większa jej średnica (czyli większy jej przekrój) oraz czym gładziej jej ścianki wewnętrzne, tym opór w rurze dla przepływającej wody będzie mniejszy. Następstwem zaś małego oporu jest zwiększony prąd wody.

Zupełnie podobnie rzecz się ma z prądem elektrycznym w przewodzie. Wolne elektrony płynące przewodem trafiają po drodze na atomy, o które się uderzają i ocierają, co hamuje je w ich biegu. Przewód jak mówimy ma pewną oporność, jest ona tym większa im dłuższy przewód, oraz tym większa im mniejszy jego przekrój. Trzecim czynnikiem stanowiącym o wielkości oporności przewodu są właściwości jego budowy wewnętrznej, zezwalające na więcej lub mniej swobodny ruch elektronów.

Przewodniki I kategorii. Ciała, których wewnętrzna budowa jest taka, że wolne elektrony poruszają się w nich bardzo łatwo, określono mianem: przewodników I kategorii. Należą do nich wszystkie metale jak np. srebro, miedź, aluminium, żelazo itd. Oczywiście nie każdy z metali przewodzi prąd elektryczny jednakowo dobrze. Np. srebro przewodzi lepiej niż miedź, miedź zaś lepiej niż żelazo itd.

Oporność właściwa. Wielkością charakterystyczną, wynikającą z wewnętrznej budowy każdego metalu a określającą jak duży opór stawia on przepływowi prądu elektrycznego, jest jego oporność właściwa. Oporność właściwą ciał przyjęto oznaczać grecką literą ρ (czytaj: ro). Jest to oporność, jaką stawia prądowi elektrycznemu przewód zrobiony z danego materiału, o długości 1 metra i przekroju 1 milimetra kwadratowego. Oporność właściwa metali jest bardzo mała.

Na końcu książki podane są w tabeli I opory właściwe niektórych metali i stopów stosowanych w elektrotechnice.

Oporność przewodów. Biorąc pod uwagę wyżej omówione trzy czynniki wpływające na oporność elektryczną przewodu, mianowicie: oporność właściwą (ρ), długość (l) i przekrój (q), możemy oporność dowolnego przewodu wyrazić matematycznie w sposób następujący:

$$R = \rho \frac{l}{q} \dots \dots (1)$$

gdzie l jest długością przewodu w metrach,

q „ powierzchnią przekroju przewodu w mm^2 ,

ρ „ opornością właściwą danego metalu.

Opór R nazywamy oporem rzeczywistym lub omowym.

Om. Jednostką oporu elektrycznego jest Om. W skróceniu oznacza się go znakiem Ω (czyt. om).

Gdy mamy do czynienia z bardzo dużymi opornościami, używamy jednostek następujących:

$$\begin{array}{ll} \text{kiloom (k}\Omega) & 1 \text{ k}\Omega = 1000 \Omega \\ \text{megom (M}\Omega) & 1 \text{ M}\Omega = 1000000 \Omega \end{array}$$

Przykład 1.

Jaką oporność posiada drut miedziany o długości 100 m i przekroju 2 mm^2 ? Oporność miedzi wynosi $\rho = 0,0178$.

$$R = \rho \frac{l}{q} = 0,0178 \frac{100}{2} = 0,89 \Omega$$

Przykład 2.

Jaką oporność będzie posiadał okrągły drut żelazny długości 1 km o średnicy $d = 2,0 \text{ mm}$?

Oporność właściwa żelaza wynosi $\rho = 0,14$.

Mając średnicę drutu, obliczamy najpierw jego przekrój:

$$q = \pi \cdot \frac{d^2}{4} = 3,14 \cdot \frac{2,0^2}{4} = 3,14 \text{ mm}^2$$

Teraz możemy obliczyć jego oporność pamiętając, że $1 \text{ km} = 1000 \text{ m}$

$$R = \rho \frac{l}{q} = 0,140 \cdot \frac{1000}{3,14} = 44,5 \Omega$$

Przewodność. W praktyce zamiast oporności używa się często pojęcia odwrotnego: przewodności.

$$G = \frac{1}{R} \dots \dots \dots (2)$$

Jednostką przewodności jest Simens (S), który jest odwrotnością oma:

$$S = \frac{1}{\Omega}$$

Przewodnością właściwą γ (czytaj: gamma) będzie odwrotność oporności właściwej ρ :

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

W tabl. I podane są przewodności właściwe metali.

Przewodność jakiegoś przewodu wyrazi się więc wzorem:

$$G = \gamma \frac{q}{l} \dots \dots \dots (3)$$

gdzie jak uprzednio l oznacza długość przewodu w metrach, q jego przekrój w mm^2 .

Materiały izolacyjne. Ciała posiadające wewnętrzną budowę niemal całkowicie hamującą przepływ wolnych elektronów nazwano materiałami izolacyjnymi. Materiałami izolacyjnymi są np.: powietrze, olej, porcelana, mika, guma, jedwab, wosk, oraz cały szereg sztucznych materiałów jak bakielit, kalit, preszpan itd.

Ich opór właściwy jest olbrzymi.

Woda chemicznie czysta jest również materiałem izolacyjnym.

Jony. Poznaliśmy przepływ prądu elektrycznego polegający na ruchu wolnych elektronów. Istnieje jednak jeszcze inny sposób przepływu prądu elektrycznego, polegający nie na bezpośrednim przepływie wolnych elektronów, lecz na ich przenoszeniu przy pomocy tzw. jonów. Jak już wiemy atom jest elektrycznie obojętny. Skoro jednak doprowadzimy w jakiś sposób do atomu dodatkowy elektron, nie będzie już w nim zachodzić równowaga elektryczna, uwarunkowana odpowiednią ilością związanych ujemnych elektronów w stosunku do dodatniego jądra. Dodatkowy elektron spowoduje, że atom będzie miał teraz charakter elektryczności ujemnej. Odwrotnie, jeśli atomowi odbierzemy jeden lub kilka normalnie mu przynależnych czyli związanych elektronów, będzie on wówczas posiadał charakter elektryczności dodatniej.

Atom z dodatkowym lub ze straconym elektronem nie nazywa się już atomem lecz ujemnym względnie dodatnim jonem (rys. 7). Taką łatwość przyjmowania dodatkowych lub tracenia własnych, związanych elektronów posiadają atomy w cieczech i gazach. Przepływ prądu elektrycznego odbywa się w nich zapomocą przenoszenia elektronów przez jony (rys. 8).

Zjawisko to przebiega w sposób następujący:

Ujemne jony znajdujące się w cieczy lub gazie pod wpływem przyciągającej siły ciała naładowanego dodatnio dążą do niego i, oddając mu swój dodatkowy elektron, stają się elektrycznie obojętne. Analogicznie jony dodatnie dążą do ciała naładowanego ujemnie i pobierając z niego brakujący im elektron stają się także elektrycznie obojętne. W ten sposób ciało naładowane dodatnio otrzymuje elektrony a ciało naładowane ujemnie ich się pozbywa; jest to równoznaczne z przepływem prądu elektrycznego. Przy przepływie jonów występuje również opór elektryczny, a to w wyniku ich wzajemnego uderzania i tarcia o siebie.

Przewodniki II kategorii. Ciała przewodzące 'prąd' elektryczny na zasadzie przenoszenia elektronów przez jony, nazywamy przewodnikami II kategorii. Są one naogół dobrymi przewodnikami. Należą do nich rozrzedzone gazy, zanieczyszczona woda, roztwory soli, kwasów oraz węgiel i szkło w stanie płynnym.

Półprzewodniki. Oprócz przewodników i materiałów izolacyjnych odróżniamy jeszcze w elektrotechnice tzw. półprzewodniki. Są to ciała, które naogół w stanie suchym są niezłymi materiałami izo-

lacyjnymi, natomiast pod wpływem wilgoci czyli mniejszej lub większej zawartości wody, stają się nawet zupełnie dobrymi przewodnikami. Do takich ciał należeć będą np.: drewno, ziemia, papier, skóra itp.

Wpływ temperatury na oporność. Przewodniki I i II kategorii różnią się nie tylko sposobem przewodzenia prądu elektrycznego, lecz i wpływem temperatury na ich oporność właściwą. Mianowicie: oporność przewodników I kategorii rośnie, zaś oporność przewodników II kategorii maleje ze wzrostem temperatury. Znaczy to, że np. ten sam drut miedziany będzie miał w zimie przy mrozie oporność mniejszą niż latem w czasie upałów. Podane w tabl. I wartości oporności właściwych są obliczone dla temp. 20°C . Chcąc znaleźć opór przewodu dla innej temperatury, będziemy się posługiwać przybliżonym wzorem następującym:

$$R_{t_2} = R_{20} [1 + \alpha (t_2 - 20)] \dots \dots \dots (4)$$

gdzie t_2 — Temp. w $^{\circ}\text{C}$ dla której szukamy oporu danego przewodnika,

α (czytaj: alfa) — współczynnik cieplny temperatury podany w tabl. I,

R_{20} — opór danego przewodnika obliczony ze wzoru $R = \rho \frac{l}{q}$
dla oporności właściwej przy 20°C podanej w tabl. I,

R_{t_2} — szukana oporność przewodu przy temperaturze t_2 .

Przykład.

Jaki opór będzie posiadać drut miedziany długości $l = 1000\text{ m}$ i o przekroju $q = 1\text{ mm}^2$ przy 20°C , przy 40°C oraz przy 30° mrozu (-30°C)?

Oporność tego drutu przy 20°C obliczamy z wartości oporności właściwej dla miedzi, podanej w tabl. I: $\rho = 0,0178$

$$R_{20} = \rho \frac{l}{q} = 0,0178 \frac{1000}{1} = 17,8 \Omega$$

Dla 40°C biorąc współczynnik temperatury $\alpha = \frac{3,9}{1000}$ z tabl. I

i stosując wzór (4) otrzymamy:

$$R_{40} = R_{20} [1 + \alpha (40 - 20)] = 17,8 [1 + 0,0039 (40 - 20)] = 17,8 (1 + 0,078) = 17,8 \cdot 1,078 = 19,1 \Omega$$

Analogicznie dla -30°C będzie:

$$R_{30} = R_{20} [1 + \alpha (-30 - 20)] = 17,8 [1 + 0,0039 \cdot (-50)] = 17,8 (1 - 0,195) = 17,8 \cdot 0,805 = 14,3 \Omega$$

Z przykładu tego widzimy, że wpływ temperatury jest dość znaczny. Jeśli w elektrotechnice mówi się o jakimś oporze bez podania dla jakiej on jest temperatury, ma się zawsze na myśli temperaturę pokojową 20°C .

ROZDZIAŁ II

OBWÓD ELEKTRYCZNY PRĄDU STAŁEGO

Źródło prądu elektrycznego. Między dwoma różnoimiennie naładowanymi ciałami, połączonymi z sobą przewodem (rys. 5) płynie prąd elektryczny tak długo, dopóki nie ustali się pomiędzy nimi stan równowagi elektrycznej. Od chwili załączenia, w miarę wyrównywania się gęstości elektronów w obu ciałach, napięcie pomiędzy nimi będzie spadać, powodując jednocześnie stałe zmniejszanie się prądu elektrycznego. W chwili zrównania się gęstości elektronów w obu ciałach, napięcie elektryczne między nimi spadnie do zera i prąd elektryczny przestanie płynąć. Takie urządzenie, jako źródło prądu elektrycznego, nie miałyby praktycznego znaczenia. Od źródła energii elektrycznej wymagamy bowiem, aby było zdolne stale, w miarę potrzeby dostarczać prądu elektrycznego.

Źródło prądu ma więc za zadanie utrzymywać między obu różnoimiennie naładowanymi ciałami stały stan jednakowej różnicy gęstości elektronów, czyli stałe między nimi napięcie. Jest ono rodzajem pompy, która musi z ciała naładowanego dodatnio odprowadzać napływające do niego elektrony, a uzupełniać nimi tracące je ciała naładowane ujemnie (rys. 9). Podobnie jak źródło prądu, działa pompa wodna podnosząca wodę z dolnego zbiornika do górnego, by jej zapas w tym ostatnim się nie wyczerpywał (rys. 10).

Do czerpania energii elektrycznej ze źródła nie jest konieczne pośrednictwo dwóch różnoimiennie naładowanych ciał. Samo już źródło posiada zawsze dwa charakterystyczne końce, z których czerpiemy prąd elektryczny, zwane biegunami lub zaciskami. Jeden z nich jest ujemny, drugi dodatni. Na biegunie ujemnym panuje nadciśnienie elektronów, na biegunie dodatnim ich podciśnienie, co jest przyczyną napięcia panującego między biegunami (rys. 11).

Obwód elektryczny. Jeśli na zaciski źródła prądu załączymy odbiornik energii elektrycznej np. żarówkę, elektrony popłyną od ujemnego bieguna przez przewód doprowadzający, odbiornik energii (żarówkę) i przez drugi przewód powrócą do bieguna dodatniego (rys. 12).

Wewnątrz źródła elektrony popłyną od bieguna dodatniego do ujemnego. Za kierunek prądu elektrycznego, jak już zaznaczyliśmy, przyjęto uważać kierunek odwrotny, a więc nazewnątrz źródła od $+$ do $-$, wewnątrz źródła od $-$ do $+$.

Układ elektryczny składający się ze źródła energii, odbiornika oraz przewodów doprowadzających, nazywa się obwodem elektrycznym.

Źródło prądu stałego i prąd stały. Źródło energii elektrycznej, które posiada jeden biegun stale dodatni a drugi stale ujemny i które przez to powoduje w obwodzie przepływ prądu elektrycznego zawsze w jednym i tym samym kierunku — nazywamy źródłem prądu stałego, a prąd taki prądem stałym.

Otwarty i zamknięty obwód elektryczny. Koniecznym warunkiem przepływu prądu jest istnienie zamkniętego obwodu elektrycznego. Przekręcenie wyłącznika elektrycznego przy zapalaniu lampy jest niczym innym, jak zamknięciem obwodu elektrycznego, składającego się ze źródła energii (znajdującego się w elektrowni), przewodów doprowadzających i odbiornika (lampy), (rys. 13).

Oporność użyteczna i nieużyteczna (straty). Odbiornik energii elektrycznej oraz doprowadzające przewody przedstawiają dla przepływającego prądu pewną oporność. Podczas gdy oporność odbiornika jest opornością użyteczną, w której wykorzystujemy energię elektryczną, to oporność przewodów wywołuje jej niepożądane straty. Rys. 14 podaje kilkakrotnie już przez nas stosowane porównanie obwodu elektrycznego z obiegiem wodnym i nie wymaga już bliższych wyjaśnień.

Prawo Ohma. Widzieliśmy już, że wielkość prądu elektrycznego zależy od napięcia i to tak, że prąd elektryczny jest tym większy, im większe jest napięcie. Poza tym stwierdziliśmy, że prąd elektryczny zależy od oporu, który mają do pokonania na swej drodze przepływające elektrony, mianowicie: prąd elektryczny jest tym większy im mniejszy jest opór. Ten związek pomiędzy prądem, napięciem i opornością jest ujęty podstawowym prawem w elektrotechnice, zwanym prawem Ohma; matematycznie wyraża się go następująco: (rys. 15)

$$\text{Prąd} = \frac{\text{Napięcie}}{\text{Oporność}}; \quad I = \frac{U}{R}; \quad \text{Amper} = \frac{\text{Wolt}}{\text{Om}} \quad \dots \quad (5)$$

$$\text{Napięcie} = \text{Prąd} \cdot \text{Oporność}; \quad U = I \cdot R; \quad \text{Wolt} = \text{Amper} \cdot \text{Om} \quad (6)$$

$$\text{Oporność} = \frac{\text{Napięcie}}{\text{Prąd}}; \quad R = \frac{U}{I}; \quad \text{Om} = \frac{\text{Wolt}}{\text{Amper}} \quad \dots \quad (7)$$

Powyższe związki pozwalają nam obliczyć jedną z trzech wielkości a mianowicie prąd w obwodzie, napięcie źródła lub oporność obwodu, jeśli znane są dwie wielkości pozostałe.

Przykład 3.

Jak duży prąd pobiera kuchenka elektryczna o oporności $R = 55 \Omega$ załączona do sieci o napięciu $U = 220 \text{ V}$?

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{55} = 4 \text{ A}$$

Przykład 4.

Na jakie napięcie należy załączyć żarówkę oświetleniową, której oporność wynosi $R = 360 \Omega$ i która powinna pobierać prąd?

$$I = \frac{1}{3} \text{ A. } U = I \cdot R = \frac{1}{3} \cdot 360 = 120 \text{ V}$$

Przykład 5.

Jaką oporność posiada żaróweczka lampki kieszonkowej, pobierająca z baterijki o napięciu $U = 4 \text{ V}$ prąd $I = 200 \text{ mA}$?

Pamiętając, że we wzorze musimy wstawiać jednostki elektryczne w woltach, omach i amperach, przeliczamy najpierw prąd z mA na A.

$$I = 200 \text{ mA} = \frac{200}{1000} = 0,2 \text{ A, a wówczas szukana}$$

$$\text{oporność: } R = \frac{U}{I} = \frac{2}{0,2} = 20 \Omega$$

Opory łączone szeregowo. Jeśli w obwodzie elektrycznym znajduje się nie jeden, lecz dwa lub więcej oporów połączonych jeden za drugim, mówimy, że opory te są połączone szeregowo (rys. 16).

Cechą charakterystyczną takiego obwodu jest to, że prąd elektryczny w każdym punkcie tego obwodu posiada tę samą wielkość.

Oporność zastępcza oporów połączonych szeregowo.

Oporność całkowita lub tzw. zastępcza, którą dla prądu elektrycznego przedstawia obwód złożony z kilku w szereg połączonych oporów, jest równa ich sumie (rys. 17).

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \dots \dots \dots (8)$$

Oznacza to, że prąd elektryczny, którego wielkość, jak wiemy, zależy od napięcia źródła i od oporu obwodu, w wypadku kilku w szereg połączonych oporów będzie taki sam, jakbyśmy te opory zastąpili jednym oporem, którego wielkość równałaby się sumie poszczególnych oporów.

Przykład 6.

Jaki prąd płynąć będzie w obwodzie składającym się z połączonych w szereg oporów $R_1 = 100 \Omega$ i $R_2 = 340 \Omega$, oraz sieci o napięciu $U = 220 \text{ V}$ (rys. 18)?

Opór zastępczy, jaki dla prądu elektrycznego przedstawiają te dwa w szereg połączone opory, wynosi:

$$R = R_1 + R_2 = 340 + 100 = 440 \Omega$$

Na zasadzie prawa Ohma obliczymy prąd:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{220}{440} = 0,5 \text{ A.}$$

Przykład 7.

Jaki prąd płynąć będzie w obwodzie elektrycznym składającym się ze źródła o napięciu $U = 40 \text{ V}$ i odbiornika energii elektrycznej o oporze $R_1 = 10 \Omega$, załączonego na źródło w odległości $l = 100 \text{ m}$ przewodami miedzianymi o przekroju $q = 0,5 \text{ mm}^2$ (rys. 19)? Znajdując w tabl. I, umieszczonej na końcu książki, oporność właściwą miedzi $\rho = 0,0178$ obliczamy najpierw ze znanego nam wzoru oporności każdego z przewodów doprowadzających.

$$R_2 = R_3 = \rho \frac{l}{q} = 0,0178 \cdot \frac{100}{0,5} = 3,5 \Omega$$

Schemat naszego obwodu da się przedstawić w postaci trzech załączonych w szereg oporności (rys. 20).

W takim obwodzie płynie prąd:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{40}{10 + 3,5 + 3,5} = \frac{40}{17,0} = 2,35 \text{ A}$$

Spadek napięcia. Napięcie na zaciskach źródła jest tą siłą, która przepycha elektrony przez obwód elektryczny złożony z jednego lub szeregu oporów. Napięcie wykonuje więc pracę. Całkowita praca wykonana przez napięcie na zaciskach rozpada się na szereg prac, które to napięcie ma do wykonania na poszczególnych oporach obwodu połączonych w szereg. Odpowiednio do tego na każdym oporze „zużywa się” część napięcia. Te części napięcia zużywane na poszczególnych oporach nazywamy spadkami napięć lub stratami napięcia.

Odpowiednio do prawa Ohma napięcie zużyte na każdym oporze, czyli spadek napięcia na każdym z nich, jest równy iloczynowi prądu przez niego płynącego przez wartość jego oporu.

Ponieważ jak wiemy prąd płynący w obwodzie utworzonym z szeregowo połączonych oporów jest wszędzie ten sam, poszczególne spadki na oporach wynoszą (rys. 21):

$$U_1 = I \cdot R_1 \quad U_2 = I \cdot R_2 \quad U_3 = I \cdot R_3$$

Z drugiej strony wiemy z prawa Ohma, że:

$$U = I (R_1 + R_2 + R_3) = I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + I \cdot R_3 \text{ czyli}$$

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

Właśnie to rozumowanie doprowadziło nas do ważnego wniosku, że napięcie na zaciskach źródła równa się sumie spadków napięć na poszczególnych opornościach szeregowo załączonych.

Przykład 8.

Jaką oporność należy załączyć w szereg z żarówką przeznaczoną na napięcie 120 V i pobierającą przy tym napięciu prąd $0,5 \text{ A}$, gdy ze-

chcemy ją załączyć na napięcie 220 V? Załączenie żarówki na wyższe napięcie od przewidzianego dla niej uszkadza ją (przepala), gdyż wyższe napięcie powoduje przepływ większego prądu niż jest dla niej przepisany (rys. 22).

Ponieważ napięcie na źródle równa się sumie spadków napięć w obwodzie, otrzymamy:

$$U = U_2 + U_1 \quad \text{czyli} \quad U_2 = U - U_1 = 220 - 120 = 100 \text{ V.}$$

Na szukanej oporności R mamy więc otrzymać przy prądzie 0,5 A spadek napięcia 100 V. Na zasadzie prawa Ohma wypada:

$$R = \frac{U_2}{I} = \frac{100}{0,5} = 200 \Omega$$

Uwaga: Stosowania żarówek przeznaczonych na napięcie 120 V do sieci 220 V za pomocą zdławienia zbyt dużego napięcia na dodatkowym oporze, nie należy nigdy praktycznie używać, gdyż energia elektryczna tracona na oporze (za którą musimy płacić elektrowni) jest niewykorzystana. Przykład 21 objaśnia to dokładnie.

Przykład 9.

Z sieci 120 V chcemy za pomocą 4 woltowych lampeczek bateryjnych oświetlić choinkę. Ile tych lampek musimy załączyć w szereg, jeśli pominiemy w obliczeniu nieznaczny opór przewodów łączących sieć z lampkami (rys. 23)?

Należy załączyć w szereg taką ilość lampek, aby spadki napięć wynoszące na każdej lampce 4 V dały w sumie 120 V. Ilość lampek wynosi więc $\frac{120}{4} = 30$ sztuk.

Obliczmy to samo zakładając, że opór obu przewodów doprowadzających prąd z sieci do lampek, wynosi wyjątkowo dużo aż 60 Ω . W tym wypadku musimy znać prąd, który każda lampka pobiera. Można odczytać go na cokole żaróweczki, gdzie cyfra 4/0,2 oznacza, że lampka przeznaczona jest na napięcie 4 V i pobiera prąd 0,2 A. Schemat naszego układu wyglądać będzie teraz tak, jak na rys. 24. Oporność przewodów możemy przedstawić jako opór 60 Ω , włączony szeregowo w jeden z przewodów. Spadek napięcia na oporności 60 Ω przy prądzie 0,2 A wynosi:

$$U_1 = I R_2 = 0,2 \cdot 60 = 12 \text{ V, a więc dla pozostałych lampek zostanie:}$$

$$U_2 = U - U_1 = 120 - 12 = 108 \text{ V.}$$

Ostatecznie obliczamy, że należy połączyć w szereg $\frac{108}{4} = 27$ lampek.

Oporności łączone równolegle. W obwodzie elektrycznym z opornościami połączonymi w szereg, prąd w każdym jego punkcie jest taki sam, napięcie źródła równe jest sumie spadków napięć na

poszczególnych opornościach, a oporność zastępcza jest równa sumie oporności. Rzecz przedstawia się inaczej, gdy mamy w obwodzie oporności połączone równolegle (rys. 25).

Prąd I płynący w przewodzie rozgałęzia się w punkcie A zwanym węzłem. Część jego popłynie przez opór R_1 jako prąd I_1 , część zaś przez opór R_2 jako prąd I_2 . Prądy te w punkcie węzłowym B spływają razem i jako prąd I wracają do źródła.

Pierwsze prawo Kirchhoffa. Tak zwane pierwsze prawo Kirchhoffa stwierdza, że suma prądów dopływających równa się sumie prądów wypływających z węzła. Matematycznie wyrazi się to dla węzła A :

$$I = I_1 + I_2$$

zaś dla węzła B :
$$I_1 + I_2 = I$$

Spadki napięć na opornościach załączonych równolegle na źródło są sobie równe i równe napięciu źródła:

$$U = U_1 = U_2$$

Spadki napięć na opornościach według prawa Ohma wynoszą:

$$U_1 = I_1 \cdot R_1 \qquad U = I_2 \cdot R_2$$

Uwzględniając, że mają one być sobie równe i równe napięciu na źródle, otrzymamy:

$$U = U_1 = U_2 = I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2$$

Z równości $I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2$ wynika: $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$

Oznacza to, że prądy płynące w gałęziach równoległych są odwrotnie proporcjonalne do ich oporów. Prąd I_1 będzie tyle razy większy od prądu I_2 , ile razy opór R_2 jest większy od oporu R_1 .

Oporność zastępcza oporności połączonych równolegle. Oporności połączone równolegle przedstawiają dla prądu płynącego ze źródła pewną wspólną oporność, zwaną opornością zastępczą. Jest ona zawsze mniejsza od najmniejszej z oporności połączonych równolegle. Aby to zrozumieć, wróćmy raz jeszcze do porównywania oporności elektrycznej z oporem, który rura stawia przepływającej wodzie. Wyobraźmy sobie, że do rury K_1 którą płynie woda (rys. 26), dołączono równolegle jeszcze jedną rurę K_2 . Ilość przepływającej wody jest teraz oczywiście większa, gdyż oprócz wody płynącej uprzednio przez rurę K_1 , płynie nadto woda przez rurę K_2 . Nastąpiło jakby zwiększenie przekroju rury K_1 o przekrój rury K_2 , a więc zmalenie oporu jaki stawiała wodzie sama rura K_1 . Obie rury można zastąpić jakąś rurą K o przekroju większym czyli o oporze mniejszym, niż miała rura K_1 . Podobnie dzieje się w obwodzie elektrycznym (rys. 27). Wspólne działania oporności R_1

i R_2 na przepływ prądu elektrycznego można zastąpić jedną opornością R . Ta zastępcza oporność w zależności od oporności połączonych równolegle wyraża się matematycznie:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \text{ czyli } R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \dots \dots (9)$$

W razie istnienia trzech oporności połączonych równolegle (rys. 28) ich oporność zastępcza oblicza się z równania:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \text{ stąd } R = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_3 \cdot R_1} (10)$$

Przykład:

Żarówka załączona na napięcie 120 V pobiera prąd 0,5 A.

Jaki prąd pobierać będą z sieci dwie lub trzy takie żarówki załączone na sieć równolegle? Jaka oporność zastępcza dla prądu przedstawia 1, 2 lub 3 żarówki (rys. 29)?

Żarówka nasza, pobierając przy napięciu 120 V prąd 0,5 A, posiada oporność:

$$R_1 = \frac{U}{I} = \frac{120}{0,5} = 240 \Omega$$

Oporność zastępcza dwóch żarówek połączonych równolegle wyniesie:

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{240 \cdot 240}{240 + 240} = 120 \Omega$$

a prąd pobierany ze źródła: $I = \frac{120}{120} = 1 \text{ A}$

Oporność zastępcza trzech żarówek połączonych równolegle wyniesie:

$$\begin{aligned} R &= \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_3 \cdot R_1} = \\ &= \frac{240 \cdot 240 \cdot 240}{3 \cdot 240 \cdot 240} = \frac{240}{3} = 80 \Omega \end{aligned}$$

a prąd pobierany ze źródła $I = \frac{120}{80} = 1,5 \text{ A}$

Przypatrując się otrzymanym wynikom, dochodzimy do ważnego wniosku, że dwie jednakowe oporności połączone równolegle przedstawiają oporność o połowę mniejszą od pojedynczej oporności i pobierają przeto dwa razy większy prąd. Trzy jednakowe oporności połączone równolegle przedstawiają oporność trzy razy mniejszą od pojedynczej i pobierają trzy razy większy prąd. Ogólnie więc: jeśli mamy kilka jednakowych oporności połączonych równolegle, to ich oporność zastępcza będzie tyle razy mniejsza od oporności pojedynczej, ile oporów załączonych jest

równolegle, a prąd pobierany ze źródła tyle razy większy. Na tej podstawie możemy obliczyć, że np. 5 lamp załączonych równolegle na sieć 120 V, z których każda ma oporność 240Ω i pobiera prąd 0,5 A, będą przedstawiały łączną oporność:

$$R = \frac{240}{5} = 48 \Omega$$

zaś prąd pobierany przez nie z sieci wyniesie:

$$I = 0,5 \cdot 5 = 2,5 \text{ A (rys. 30)}$$

Przykład 11.

Kuchenka elektryczna posiada czterostopniowy przełącznik. Przy zerowym położeniu kuchenka jest wyłączona. Położenia 1, 2, 3 odpowiadają różnym stopniom ciepłoty kuchenki, które uzyskuje się przez równoległe włączanie oporów (rys. 31).

W położeniu 1 włączona jest tylko oporność $R_1 = 220 \Omega$. W położeniu 2 załącza się równolegle do niej oporność $R_2 = 183 \Omega$. W położeniu 3 równoległe do dwóch poprzednich jeszcze oporność $R_3 = 150 \Omega$. Jaką oporność posiada kuchenka w położeniach 2 i 3 i jaki prąd pobiera z sieci 220 V w położeniach 1, 2, 3?

W położeniu 1, gdy załączony jest tylko opór 220Ω , kuchenka pobiera prąd:

$$I_1 = \frac{U}{R} = \frac{220}{22} = 1 \text{ A.}$$

W położeniu przełącznika 2 załączone są równoległe opory 220Ω i 183Ω . Opór więc ich zastępczy jest:

$$R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{220 \cdot 183}{220 + 183} = 100 \Omega$$

a prąd pobierany z sieci:

$$I_{12} = \frac{U}{R_{12}} = \frac{220}{100} = 2,2 \text{ A}$$

W położeniu przełącznika 3 załączone są równoległe 3 opory: 220Ω , 183Ω i 150Ω , opór więc ich zastępczy jest:

$$\begin{aligned} R_{123} &= \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_3 \cdot R_1} = \\ &= \frac{220 \cdot 183 \cdot 150}{220 \cdot 183 + 183 \cdot 150 + 150 \cdot 220} = 60 \Omega \end{aligned}$$

Zastępczy ten opór można łatwiej obliczyć na mocy równoległego połączenia znanego nam już oporu zastępczego R_{12} z oporem R_3 :

$$R_{123} = \frac{R_{12} \cdot R_3}{R_{12} + R_3} = \frac{100 \cdot 150}{100 + 150} = 60 \Omega$$

Prąd pobierany w tym położeniu przełącznika wynosi:

$$I_{123} = \frac{U}{R_{123}} = \frac{220}{60} = 3,67 \text{ A.}$$

Prądy płynące przez poszczególne opory da się obliczyć z prawa Ohma:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{220}{220} = 1,00 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{220}{183} = 1,20 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{U}{R_3} = \frac{220}{150} = 1,47 \text{ A}$$

Wobec tego prąd płynący z sieci w położeniu przełącznika 2 i 3 będzie:

$$I_{12} = I_1 + I_2 = 1 + 1,2 = 2,20 \text{ A}$$

$$I_{123} = I_1 + I_2 + I_3 = 1 + 1,2 + 1,47 = 3,67 \text{ A}$$

co zgadza się z poprzednio otrzymanymi wynikami.

Szeregowo-równoległe połączenia oporności. Często w praktyce spotyka się kombinacje szeregowo-równoległe łączonych oporności. Układy takie dadzą się zawsze rozwiązać na zasadzie praw, dotychczas przez nas poznanych, jak to przedstawia poniższy przykład.

Przykład 12.

Obwód elektryczny jak na rys. 32, załączony jest na napięcie 90 V. Obliczyć prądy i spadki napięć na poszczególnych opornościach.

Oporność zastępcza oporów R_2 i R_3 będzie:

$$R_3 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = \frac{30 \cdot 100}{30 + 100} = 23 \Omega$$

Oporność zastępcza oporów R_4 i R_5 będzie:

$$R_{45} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5} = \frac{30 \cdot 20}{30 + 20} = 12 \Omega$$

Układ więc będzie wyglądał jakby na źródło załączono szeregowe trzy opory: $R_1 = 10 \Omega$, $R_{23} = 23 \Omega$, $R_{45} = 12 \Omega$.

Całkowita oporność zastępcza obciążająca źródło wynosi:

$$R = R_1 + R_{23} + R_{45} = 10 + 23 + 12 = 45 \Omega$$

Prąd płynący ze źródła:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{90}{45} = 2 \text{ A}$$

Spadek napięcia na oporze R_1 będzie:

$$U_1 = I \cdot R_1 = 2 \cdot 10 = 20 \text{ V}$$

Spadek napięcia na oporze R_2 względnie R_3 będzie:

$$U_{23} = I \cdot R_{23} = 2 \cdot 23 = 46 \text{ V}$$

Spadek na oporze R_4 względnie R_5 będzie:

$$U_{45} = I \cdot R_{45} = 2 \cdot 12 = 24 \text{ V}$$

Suma spadków napięć winna być równa napięciu źródła. Sprawdzamy:

$$U_1 + U_{23} + U_{45} = U = 20 + 46 + 24 = 90 \text{ V}$$

Prąd płynący przez opory R_2 i R_3 znajdziemy z prawa Ohma:

$$I_2 = \frac{U_{23}}{R_2} = \frac{46}{100} = 0,46 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{U_{23}}{R_3} = \frac{46}{30} = 1,54 \text{ A}$$

W sumie daje to rzeczywiście $I_2 + I_3 = 0,46 + 1,54 = 2 \text{ A}$.

Podobnie znajdziemy prądy w R_4 i R_5 :

$$I_4 = \frac{U_{45}}{R_4} = \frac{24}{20} = 1,2 \text{ A}$$

$$I_5 = \frac{U_{45}}{R_5} = \frac{24}{30} = 0,8 \text{ A}$$

Tu również otrzymujemy w sumie $I_4 + I_5 = 1,2 + 0,8 = 2,0 \text{ A}$.

Potencjometr. Jednym z szeregowo-równoległych połączeń oporów często stosowanym w praktyce, szczególnie laboratoryjnej, jest układ potencjometryczny, pozwalający na zasilanie odbiornika energią dowolnym napięciem mniejszym od napięcia źródła.

Na źródło napięcia (rys. 33) załączony jest opór R . Ruchomy kontakt K na tym oporze zezwala zasilac odbiorniki o oporze R_3 wszystkimi dowolnymi napięciami począwszy od zera, aż do napięcia źródła U . Niech kontakt K leży w takim położeniu, że dzieli opór R na dwa opory R_1 i R_2 . Oporność zastępcza całego układu jako szeregowo połączenie oporu R_1 z równolegle połączonymi oporami R_2 i R_3 równa się:

$$R_{123} = R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}$$

Zaś prąd pobierany ze źródła: $I = \frac{U}{R_{123}}$

Napięcie U_3 na oporze R_3 jest równe napięciu źródła U zmniejszonemu o spadek napięcia na oporze R_1 .

$$U_3 = U - I \cdot R_1$$

Przykład 13.

Jakim napięciem U_3 zasilany będzie odbiornik o oporze $R_3 = 200 \Omega$, jeśli kontakt K potencjometru R (rys. 33), załączonego na napięciu 120 V dzieli go na dwa opory $R_1 = 80 \Omega$ i $R_2 = 50 \Omega$? Oporność zastępcza układu:

$$R_{123} = R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = 80 + \frac{50 \cdot 200}{50 + 200} = 120 \Omega$$

Prąd pobierany ze źródła:

$$I = \frac{U}{R_{123}} = \frac{120}{120} = 1 \text{ A}$$

Napięcie U_3 na odbiorniku R_3 wyniesie:

$$U_3 = U - I \cdot R_1 = 120 - 1 \cdot 80 = 40 \text{ V}$$

Oporność wewnętrzna źródła. Prąd płynący w obwodzie elektrycznym napotyka na swej drodze nie tylko opory zewnętrzne pod postacią przewodów doprowadzających i oporów odbiornika energii elektrycznej. Ten sam prąd, który płynie w oporach zewnętrznych, płynie również i wewnątrz przez źródło. A każde źródło energii, czy to prądnica, czy bateria sucha lub akumulator posiadają również opór, zwany oporem wewnętrznym źródła (R_w).

Wewnętrzny spadek napięcia. Na pokonanie oporności wewnętrznej źródło musi również stracić pewne napięcie; stratę tę nazywamy wewnętrznym spadkiem napięcia ΔU , w odróżnieniu od zewnętrznych spadków napięcia U , występujących na opornościach załączonych poza źródłem (rys. 34).

Siła elektromotoryczna (SEM). Zatem napięcie na zaciskach źródła, które jest równe spadkom napięć na oporach zewnętrznych, nie jest całkowitym napięciem rzeczywistym, dawanym przez źródło. Całkowite napięcie działające w obwodzie elektrycznym, siedzibą którego jest źródło energii, jest większe od napięcia na zaciskach o wewnętrzny spadek napięcia i nazywa się siłą elektromotoryczną źródła (SEM); oznacza się ją literą E .

$$E = U + \Delta U = I \cdot R + I \cdot R_w = I (R + R_w)$$

Bieg jałowy (luzem). Jeśli na źródło energii nie jest załączony obwód elektryczny, względnie załączony obwód jest otwarty, wówczas prąd nie będzie płynął ze źródła i mówimy, że jest ono nieobciążone lub, że znajduje się w biegu jałowym, inaczej w biegu luzem. Skoro prąd nie płynie, niema w źródle wewnętrznego spadku napięcia. A więc przy biegu jałowym napięcie na zaciskach

kach jest równe sile elektromotorycznej źródła (rys. 35).
 $I = 0$; $U = E$.

Zwarcie. Jeżeli zaciski źródła zostaną połączone przewodem o znikomej oporności, praktycznie równej zero ($R = 0$), mówimy że źródło energii elektrycznej jest zwarte (rys. 36). Prąd płynący ze źródła zwany prądem zwarcia (I_z) jest wtedy bardzo duży i wielkość jego zależy od oporności wewnętrznej źródła

$$I_z = \frac{E}{R_w} \dots (11)$$

a napięcie na zaciskach równa się zero: $U = I \cdot R = I \cdot 0 = 0$.

Przykład 14.

Napięcie zmierzone na zaciskach akumulatora przy biegu jałowym, a więc jego SEM wynosi 4,2 V, jego oporność wewnętrzna jest bardzo mała, mianowicie $R_w = 0,02 \Omega$. Jakie napięcie na zaciskach i jaki wewnętrzny spadek napięcia będzie posiadał akumulator, oraz jakie prądy będą płynęły przy obciążeniu go oporami:

4 Ω , 0,1 Ω i przy zwarciu?

Przy obciążeniu 4 Ω otrzymamy:

$$E = U + \Delta U = I \cdot R + I \cdot R_w = I (R + R_w)$$

$$\text{stad prąd: } I = \frac{E}{R + R_w} = \frac{4,2}{4 + 0,02} = 1,045 \text{ A}$$

Napięcie na zaciskach: $U = I \cdot R = 1,045 \cdot 4 = 4,18 \text{ V}$.

Wewnętrzny spadek napięcia:

$$\Delta U = I \cdot R_w = 1,045 \cdot 0,02 = 0,02 \text{ V}$$

Przy obciążeniu 0,1 Ω :

$$I = \frac{E}{R + R_w} = \frac{4,2}{0,1 + 0,02} = 35 \text{ A}$$

$$U = I \cdot R = 35 \cdot 0,1 = 3,5 \text{ V}$$

$$\Delta U = I \cdot R_w = 35 \cdot 0,02 = 0,7 \text{ V}$$

Przy zwarciu: prąd zwarcia

$$I_z = \frac{E}{R + R_w} = \frac{4,2}{0 + 0,02} = 210 \text{ A}$$

Napięcie na zaciskach $U = 0$.

Wewnętrzny spadek napięcia

$$\Delta U = I \cdot R_w = 210 \cdot 0,02 = 4,2 = E$$

Uwaga: Mała oporność wewnętrzna akumulatora powoduje więc bardzo duży prąd zwarcia, który może uszkodzić akumulator. Dlatego nie wolno dopuścić do zwarcia akumulatora.

Przykład 15.

Rozwiązać zadanie 14 w założeniu, że zamiast akumulatora mamy baterię suchą o SEM = 4,2 V i oporności wewnętrznej $R_w = 1 \Omega$. Przy obciążeniu 4Ω otrzymamy:

$$\text{prąd } I = \frac{E}{R + R_w} = \frac{4,2}{4 + 1} = 0,84 \text{ A}$$

$$\text{napięcie na zaciskach } U = I \cdot R = 0,84 \cdot 4 = 3,36 \text{ V}$$

$$\text{wewnętrzny spadek napięcia } \Delta U = I \cdot R_w = 0,84 \cdot 1 = 0,84 \text{ V}$$

przy obciążeniu $0,1 \Omega$:

$$I = \frac{4,2}{0,1 + 1} = 3,82 \text{ A}$$

$$\text{napięcie na zaciskach: } U = I \cdot R = 3,82 \cdot 0,1 = 0,38 \text{ V}$$

$$\text{wewnętrzny spadek napięcia } \Delta U = I \cdot R_w = 3,82 \cdot 1 = 3,82 \text{ V}$$

$$\text{przy zwarcu: } I_z = \frac{4,2}{0 + 1} = 4,2 \text{ A}$$

$$\text{wewnętrzny spadek napięcia } \Delta U = I \cdot R_w = 4,2 \cdot 1 = 4,2 \text{ V} = E.$$

Przykład 16.

Jaką oporność wewnętrzną R_w posiada źródło, jeśli napięcie na zaciskach zmierzone przy biegu jałowym (a więc SEM) wynosi 120 V, zaś przy obciążeniu oporem zewnętrznym $R = 40 \Omega$ tylko 100 V?

$$I = \frac{U}{R} = \frac{100}{40} = 2,5 \text{ A}$$

$$E = I \cdot R + I \cdot R_w$$

$$120 = 100 + I \cdot R_w$$

$$I \cdot R_w = 120 - 100 = 20 \text{ V}$$

$$R_w = \frac{20}{I} = \frac{20}{2,5} = 8 \Omega$$

Szeregowe łączenie źródeł. W celu otrzymania większego napięcia, niż go może dostarczyć pojedyncze źródło energii elektrycznej, często w praktyce stosuje się szeregowe połączenie kilku źródeł (rys. 38). Źródła prądu np. baterie suche lub akumulatory łączy się wówczas w ten sposób, że biegun dodatni źródła łączy się z biegunem ujemnym następnego źródła itd. Napięcie na zaciskach A — B tak w szereg połączonych źródeł równe jest sumie napięć poszczególnych elementów.

Opór wewnętrzny takiego zespołu jest równy sumie oporów wewnętrznych poszczególnych źródeł. Prąd I płynący przez wszystkie źródła ma tę samą wielkość.

Drugie prawo Kirchhoffa. Zależność między SEM źródeł załączonych szeregowo, a zewnętrznymi i wewnętrznymi spadkami napięć w obwodzie elektrycznym daje nam II prawo Kirchhoffa, które brzmi:

W obwodzie elektrycznym suma SEM źródeł załączonych szeregowo równa się sumie spadków napięć na oporach wewnętrznych źródeł i na oporach zewnętrznych obwodu. Czyli

$$\begin{aligned} E_1 + E_2 + E_3 + \dots &= \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 + \dots + \\ &+ U_1 + U_2 + U_3 + \dots = \\ = I (R_{w1} + R_{w2} + R_{w3} + \dots + R_1 + R_2 + R_3 + \dots) \quad \dots (12) \end{aligned}$$

Równoległe łączenie źródeł. Drugim sposobem łączenia źródeł jest ich połączenie równoległe (rys. 39). W tym wypadku należy łączyć źródła posiadające te same SEM, przy czym bieguny jednoimienne łączy się razem. Napięcie źródeł połączonych równoległe jest równe napięciu pojedynczego źródła, prąd natomiast płynący w obwodzie równa się sumie prądów dawanych przez poszczególne źródła. Wielkość prądu danego przez poszczególne źródło zależy od jego oporu wewnętrznego.

Przykład 17.

Dwa źródła połączone szeregowo, posiadające SEM i oporności wewnętrzne o wartościach podanych na rys. 40, pracują na opór $R = 10 \Omega$. Jaki prąd I będzie płynął w obwodzie? Jakie napięcie U_1 i U_2 dadzą poszczególne źródła? Jakie będzie sumaryczne napięcie U na zaciskach A — B?

Na zasadzie drugiego prawa Kirchhoffa mamy:

$$E_1 + E_2 = U_1 + U_2 + \Delta U_1 + \Delta U_2$$

Ponieważ $U_1 + U_2 = U = I \cdot R$

$$\Delta U_1 = I \cdot R_{w1} \quad \Delta U_2 = I \cdot R_{w2}$$

a więc: $E_1 + E_2 = I \cdot R + I \cdot R_{w1} + I \cdot R_{w2} = I (R + R_{w1} + R_{w2})$

$$18 + 6 = I \cdot (10 + 1,5 + 0,5)$$

$$I = \frac{18 + 6}{10 + 1,5 + 0,5} = \frac{24}{12} = 2 \text{ A}$$

$$U_1 = E_1 - I \cdot R_{w1} = 18 - 1,5 \cdot 2 = 15 \text{ V}$$

$$U_2 = E_2 - I \cdot R_{w2} = 6 - 0,5 \cdot 2 = 5 \text{ V}$$

$$U = U_1 + U_2 = 15 + 5 = 20 \text{ V}$$

Moc i praca. Wykonanie każdej pracy fizycznej wymaga pewnego wysiłku. Dana praca może być wykonana w czasie krótszym przy większym wysiłku, lub w czasie dłuższym przy mniejszym wysiłku fizycznym. Mamy np. do wykonania pracę, polegającą na wniesieniu z parteru na strych domu 10,000 cegieł. Czy zrobimy to w ciągu trzech dni, czy też w ciągu jednego dnia, zostanie wykonana ta sama praca, wysiłek zaś, czyli moc potrzebna do tego będzie w drugim wypadku trzy razy większa.

Moc jest to praca wykonana w ciągu pewnego czasu:

$$\text{Moc} = \frac{\text{Praca}}{\text{Czas}} \quad \text{Praca} = \text{Moc} \cdot \text{Czas}$$

Spadająca woda zdolna jest wykonywać pracę. Posiada więc ona pewną moc. Moc ta zależy od różnicy poziomów zbiorników z wodą i od ilości wody jaka przepływa w jednostce czasu. Czym większa różnica poziomów i czym większy prąd wody, tem większa jej moc. Na zasadzie porównania obwodu elektrycznego z obiegiem wodnym (rys. 14), stwierdzamy, że różnica poziomów wody odpowiada napięciu elektrycznemu, a ilość wody przepływającej w ciągu jednej sekundy odpowiada ilości elektronów przepływających w ciągu jednej sekundy — czyli prądowi elektrycznemu.

Moc prądu stałego. Analogicznie więc do mocy spadającej wody, moc prądu elektrycznego będzie tym większa czym większe napięcie i większy prąd, a zatem:

$$\begin{aligned} \text{Moc} &= \text{Napięcie} \cdot \text{Prąd} \\ N &= U \cdot I \end{aligned}$$

Jednostką mocy elektrycznej jest Wat (w skróceniu: W).

Jest to moc jaką daje prąd jednego ampera przy napięciu jednego Wolta.

$$1 \text{ Wat} = 1 \text{ Volt} \cdot 1 \text{ Amper}$$

Więszą jednostką mocy jest kilowat:

$$1 \text{ kilowat (kW)} \quad 1 \text{ kW} = 1000 \text{ W.}$$

W mechanice przyjętą powszechnie jednostką mocy jest koń mechaniczny (KM). Liczbowa zależność między KM a W jest następująca:

$$\begin{aligned} 1 \text{ kW} &= 1,36 \text{ KM} \\ 1 \text{ KM} &= 738 \text{ W} \end{aligned}$$

Wprowadzając do wzoru na moc na zasadzie prawa Ohma opór R i usuwając odpowiednio prąd I lub napięcie U otrzymamy dalsze wyrażenia na moc:

$$\begin{aligned} N &= U \cdot I \\ N &= I^2 \cdot R \end{aligned}$$

$$N = \frac{U^2}{R} \dots \dots \dots (13)$$

Wszelkie urządzenia do odbioru energii elektrycznej jak silniki, grzejniki elektryczne, żarówki td. mają wycechowaną moc, którą pobierają z sieci elektrycznej o danym napięciu.

Praca prądu stałego. Praca prądu elektrycznego, jako iloczyn mocy N przez czas t , będzie:

$$A = N \cdot t$$

Wstawiając kolejno wyżej wypisane wzory na moc, otrzymamy wyrażenia na pracę prądu:

$$A = U \cdot I \cdot t$$

$$A = I^2 \cdot R \cdot t$$

$$A = \frac{U^2}{R} \cdot t \dots \dots \dots (14)$$

Jednostką pracy jest Watsekunda (Ws), którą otrzymamy, gdy moc mierzymy w watach, (względnie prąd w amperach, a napięcie w woltach) i czas w sekundach. Ponieważ Ws jest małą jednostką pracy, stosuje się zazwyczaj jednostkę:

$$\text{Kilowatgodzina (kWh) } 1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Ws}$$

kWh są tymi jednostkami pracy, które wskazuje licznik elektryczny mierzący pracę prądu zużytą na oświetlenie, ogrzanie żelazka czy kuchenki. Za każdą kWh płaci się elektrowni według ustalonej taryfy.

Przykład 18.

Jaką moc posiada w przykładzie 3 podana kuchenka elektryczna?

$$N = U \cdot I = 220 \cdot 4 = 880 \text{ W}$$

$$\text{lub } N = I^2 \cdot R = 4 \cdot 4 \cdot 55 = 880 \text{ W}$$

$$\text{lub } N = \frac{U^2}{R} = \frac{220 \cdot 220}{55} = 880 \text{ W}$$

Przykład 19.

Ile watów posiada żarówka z przykładu 4?

$$N = U \cdot I = 120 \cdot \frac{1}{3} = 40 \text{ W}$$

Przykład 20.

Ile kosztować będzie 2-godzinna praca kuchenki z przykładu 18, jeśli według taryfy 1 kWh pracy prądu elektrycznego kosztuje 50 gr? Praca kuchenki elektrycznej w ciągu 2 godzin, uwzględniając, że $880 \text{ W} = 0,88 \text{ kW}$ wyniesie: $A = N \cdot t = 0,88 \cdot 2 = 1,76 \text{ kWh}$. Opłata wyniesie zatem: $1,76 \cdot 50 = 88$ groszy.

Przykład 21.

Jaką moc ma żarówka z przykładu⁸, a jaka moc zostaje bezużytecznie tracona na oporze R? Ile kosztować będzie 10-godzinna praca takiego połączenia, ile z tego płacimy niepotrzebnie, jeśli elektrownia za 1 kWh liczy nam 1 złoty? (rys. 22).

$$\text{moc żarówki: } I_1 = U_1 \cdot I = 120 \cdot 0,5 = 60 \text{ W}$$

$$\text{moc tracona w oporze } N_2 = U_2 \cdot I = 100 \cdot 0,5 = 50 \text{ W}$$

całkowita moc takiego połączenia:

$$N = N_1 + N_2 = 60 + 50 = 110 \text{ W} = 0,11 \text{ kW}$$

10-cio godzinna praca wyniesie:

$$A = N \cdot t = 0,11 \cdot 10 = 1,1 \text{ kWh}$$

i kosztować będzie: $1,1 \cdot 1 = 1,1 \text{ zł}$.

Z tego za traconą bezużytecznie pracę prądu w oporze:

$$A_2 = N_2 \cdot t = 0,05 \cdot 10 = 0,5 \text{ kWh}$$

płacimy niepotrzebnie $0,5 \cdot 1 = 0,50 \text{ zł}$.

Ciepło Joul'a. Wielostronne zastosowanie energii elektrycznej zawiązkujemy łatwości zamiany jej w inne rodzaje energii. W jaki rodzaj energii zostaje zamieniona energia elektryczna, zależy od urządzenia przez które przepływa prąd elektryczny. Przy przepływie prądu przez opór energia elektryczna zamienia się zawsze w ciepło na skutek tarcia elektronów o atomy, tak samo jak ciepło powstające przy tarcu mechanicznym.

Jak widzieliśmy praca prądu elektrycznego I płynącego przez opór R wynosi: $A = I^2 \cdot R \cdot t$.

Na zasadzie dokładnych pomiarów stwierdzono, że ilość ciepła otrzymana z tej pracy wynosi:

$$Q = 0,239 \cdot I^2 \cdot R \cdot t \quad \text{cal} \quad \dots \quad (15)$$

Jest to tak zwane ciepło Joul'a wydzielane przez prąd elektryczny płynący przez opór. Jednostką ciepła jest kaloria gramowa (cal). Jest to ilość ciepła potrzebna do ogrzania 1 grama wody o 1°C .

Większą jednostką ciepła jest kaloria kilogramowa (Kcal). Jest to ilość ciepła potrzebna do ogrzania 1 kg (w przybliżeniu 1 litra) wody o 1°C .

Ze wzoru na ciepło Joul'a przez wstawienie odpowiednich jednostek otrzymamy, że praca: $1 \text{ kWh} = 860 \text{ Kcal}$

$$\text{lub ciepło: } 1 \text{ Kcal} = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ kWh.}$$

Sprawność. W urządzeniach przekształcających jeden rodzaj energii w drugi, część jej zostaje zużyta na pokrycie strat, które są przy tych przemianach nieuniknione. Mówi się wtedy o stratach na opór w lo-

żyskach, opór powietrza i grzanie się uzwojeń w silnikach elektrycznych, na uboczne bezużyteczne uchodzenie ciepła w grzejnikach elektrycznych itd. Dlatego też ilość użytecznej energii uzyskanej z danego urządzenia jest zawsze mniejsza od ilości energii doprowadzonej do niego. Stosunek pracy (A_2 lub mocy N_2) otrzymanej do pracy (A_1 lub mocy N_1) włożonej nazywa się sprawnością (η , czytają: eta) urządzenia. Sprawność podawana jest zwykle w procentach:

$$\text{Sprawność} = \frac{\text{Praca (moc) otrzymana}}{\text{Praca (moc) włożona}}$$

$$\eta = \frac{A_2}{A_1} = \frac{N_2}{N_1} \text{ lub } \eta = \frac{N_2}{N_1} \cdot 100\%$$

Im mniejsze są straty, tym większa sprawność urządzenia.

Przykład 22.

Silnik elektryczny pobiera prąd 12 amperów z sieci 220 V i napędza pompę o mocy 3 KM. Jaka jest jego sprawność?

Moc pobierana z sieci:

$$N_1 = U \cdot I = 220 \cdot 12 = 2640 \text{ W} = 2,64 \text{ kW}$$

Na zasadzie wiadomej już nam zależności, że

$$1 \text{ KM} = 736 \text{ W} = 0,736 \text{ kW} \text{ znajdziemy } N_2 = 3 \text{ KM} = 2,208 \text{ kW}.$$

Zatem sprawność silnika jako stosunek mocy otrzymanej do mocy doprowadzonej wyniesie:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{2,208}{2,64} \cdot 100\% = 83,6\%$$

16,4% czyli różnica $N_1 - N_2 = 2,64 - 2,208 = 0,432 \text{ kW}$ idzie na pokrycie strat.

Przykład 23.

Ile kWh energii elektrycznej potrzeba do zagotowania w temperaturze pokojowej (20° C) dwóch litrów wody? Sprawność kuchenki wynosi $\eta = 80\%$.

Aby zagotować wodę, należy podnieść jej temperaturę z 20° na 100°, czyli podgrzać ją o $100 - 20 = 80^\circ$.

Aby podgrzać 2 litry wody o 80° należy doprowadzić do niej energię w postaci ciepła $A_2 = 2 \cdot 80 = 160 \text{ Kcal}$ ciepła.

Wiemy, że: $1 \text{ Kcal} = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ kWh}$, a więc

$$A_2 = 160 \cdot 1,16 \cdot 10^{-3} = 0,1856 \text{ kWh}$$

Przy sprawności kuchenki $\eta = 80\%$ energia pobrana z sieci wyniesie:

$$A_1 = \frac{A_2}{\eta} = \frac{0,1856}{0,8} = 0,232 \text{ kWh}$$

Jaką moc musi posiadać kuchenka, aby woda zagotowała się w ciągu 15 minut? Jaki opór winien mieć grzejnik kuchenki, jeśli przeznaczona jest ona na napięcie 220 V?

$$15 \text{ min.} = 0,25 \text{ godz.}$$

$$N = \frac{A}{t} = \frac{0,232}{0,25} = 0,928 \text{ kW} = 928 \text{ W}$$

$$R = \frac{U^2}{N} = \frac{220^2}{928} = 52 \ \Omega$$

Użyteczne i szkodliwe ciepło przy przepływie prądu elektrycznego. Zjawisko wydzielania się ciepła na oporności przewodnika przy przepływie prądu elektrycznego jest czasem pożądane, czasem zaś szkodliwe. Ciepłe działanie prądu wyzyskuje się celowo w grzejnikach i żarówkach elektrycznych. Natomiast nieuniknione wydzielanie się ciepła przy przepływie przez źródło energii elektrycznej i przez przesyłające ją przewody jest zjawiskiem niepożądanym (porównaj na stronie 15 oporność użyteczną i nieużyteczną). Zależnie od wielkości oporności wewnętrznej źródła, oporności napowietrznych linii elektrycznych lub kabli oraz przewodów w mieszkaniu, i zależnie od natężenia płynącego przez nie prądu, powstaje ciepło na które zużywa się bezużytecznie część energii elektrycznej.

Grzejniki elektryczne. Grzejnik elektryczny jak np. żelazko, kuchenka, kolba do lutowania, składają się zawsze z właściwego grzejnika i obudowy dostosowanej do przeznaczenia sprzętu. Ponieważ ciepło powstałe przy przepływie prądu elektrycznego zależy jest od wielkości oporu, przeto właściwy przewód grzejny musi być zrobiony z metalu (lub stopu) o względnie dużym oporze właściwym. Punkt topliwości tego metalu musi być bardzo wysoki, by pod wpływem wydzielanego ciepła nie rozgrzał się do białości i następnie nie stopił. W praktyce stosuje się zazwyczaj stopy jak nikelina, lub chromonikelina (patrz tabl. I). Właściwy grzejnik jest więc drutem oporowym, nawiniętym na materiale izolacyjnym odpornym na wysokie temperatury jak np. mika, azbest, porcelana, izolowanym odpowiednio od metalowej obudowy sprzętu, względnie zaprasowanym wprost w materiał izolacyjny (rys. 41, 42).

Przykład 24.

Jakiej długości drut oporowy z chromonikeliny o średnicy 0,5 mm musi posiadać grzejnik żelazka o mocy 880 W przeznaczony na napięcie sieci 220 V?

$$\text{Opór drutu musi wynosić: } R = \frac{U^2}{N} = \frac{220^2}{880} = 55 \ \Omega$$

$$\text{Przekrój drutu wynosi: } q = \pi \frac{d^2}{4} = 3,14 \cdot \frac{0,5^2}{4} = 0,196 \text{ mm}^2$$

$$\text{Oporność właściwa chromonikeliny } \rho = 1 \text{ (patrz tabl. I)}$$

$$\text{Długość drutu będzie: } l = R \cdot q \cdot \frac{1}{\rho} = 55 \cdot 0,196 \cdot 1 = 10,8 \text{ m}$$

Elektryczne oświetlenie żarówkowe. Zamiana energii elektrycznej na światło odbywa się w żarówkach elektrycznych pośrednio poprzez ciepłe działanie prądu elektrycznego. Prąd elektryczny rozżarza mianowicie włókno żarówki do białości, co powoduje promieniowanie energii świetlnej. Oczywiście włókno musi być zrobione z bardzo trudno topliwego metalu, by się nie stopiło. Temperatura włókna, robionego w nowoczesnych żarówkach z wolframu, dochodzi do 2500°C . Przy tak wysokiej temperaturze włókno lampy przy obecności tlenu zawartego w powietrzu spaliłoby się odrazu, zaś w bańce z wypompowanym powietrzem, skutkiem wysokiej próżni, rozżarzone włókno dość szybko uległoby rozpyleniu, w obu wypadkach życie takiej lampy nie trwałoby długo.

Dlatego też obecnie używane żarówki wypełnia się gazem, który nie wiąże się chemicznie z rozżarzoną włóknem metalowym i opóźnia jego rozpylanie. Życie obecnych żarówek dochodzi do 1500 godzin pracy. Po tym czasie skutkiem nierównomiernego, a nieuniknionego mimo wszystko rozpylania, przekrój włókna staje się w niektórych miejscach cięszyszy. Prąd płynący powoduje na tych właśnie zwężonych, a więc na miejscach o większej oporności coraz żywsze wydzielanie się ciepła, silniejsze rozpylanie się włókna w tych miejscach i w końcu jego zerwanie.

Żarówka jest przepalona.

Żarówki elektryczne są produkowane i cechowane według mocy jaką pobierają z sieci. Moce te są znormalizowane i wynoszą: 15, 25, 40, 60, 75, 100, 150, 200, 300 itd. Watów. Na cokole żarówki są podane zawsze dwie liczby. Pierwsza oznacza napięcie sieci na jakie żarówka jest przeznaczona, druga moc jaką żarówka pobiera. Należy tu jeszcze zaznaczyć, że im większa moc żarówki, tym większa jest jej wydajność świetlna. W związku z tym, choć cztery żarówki 25-cio Watowe pobierają tę samą moc co jedna żarówka 100 Watowa, to jednak promieniowana przez nie energia świetlna jest mniejsza, niż ją daje pojedyncza żarówka 100 Wat.

Przykład 25.

Jaki ma opór i jaki prąd pobiera z sieci 220 V żarówka w stanie zimnym i w stanie gorącym przy temperaturze 2200°C ?

Włókno żarówki zrobione jest z drutu wolframowego o średnicy 0,024 mm i długości 60 cm.

$$\text{Przekrój włókna } \pi \cdot \frac{d^2}{4} = 3,14 \cdot \frac{0,024^2}{4} = 0,000452 \text{ mm}^2$$

Opór zimnego włókna (przy 20°) jest: (ρ z tabl. I $\rho = 0,055$)

$$R_{20} = \frac{0,055 \cdot 0,60}{0,000452} = 73 \Omega$$

Przy temperaturze 2200° opór tego włókna według uproszczonego wzoru (4) będzie (α z tabl I $\alpha = 0,004$):

$$R_{2200} = R_{20} [1 + \alpha (t_2 - 20)] = \\ = 73 [1 + 0,004 (2200 - 20)] = 73 (1 + 8,94) = 73 \cdot 9,94 = 725 \Omega$$

Według prawa Ohma prąd pobierany przez żarówkę w stanie zimnym będzie:

$$I_{2200} = \frac{220}{73} = 3 \text{ A}$$

$$\text{a w stanie gorącym: } I_{1,0} = \frac{220}{725} = 0,3 \text{ A}$$

Wiedziemy więc, że nasza żarówka w chwili załączenia pobiera prąd 10 razy większy niż przy pracy normalnej.

Dopuszczalne obciążenie przewodów. Przewody doprowadzające prąd elektryczny do odbiornika, ze względu na straty i wynikające stąd nagrzanie, nie mogą być przeciążone powyżej pewnego natężenia prądu. W przeciwnym razie grozi to np. w wypadku zwarcia między przewodami lub przy załączeniu dużej ilości odbiorników energii, rozgrzaniem się przewodów do czerwoności, zapaleniem się ich izolacji i pożarem budynku. Dlatego też dla każdego przekroju drutu podane są dopuszczalne natężenia prądów. Tablica II podaje ustalone przepisami a więc znormalizowane przekroje izolowanych drutów miedzianych używanych na przewody i dopuszczalne dla nich natężenia prądów. Oczywiście dla napowietrznych przewodów nieizolowanych są dozwolone natężenia prądów parokrotnie większe.

Bezpieczniki topikowe. W celu zabezpieczenia przewodów przed nadmiernym ich przeciążeniem stosuje się powszechnie tzw. bezpieczniki topikowe, których zasada działania oparta jest również na cieplnym działaniu prądu elektrycznego. Bezpieczniki załącza się w przewody w szereg ze źródłem prądu i z odbiornikiem energii elektrycznej (rys. 43).

Bezpiecznik składa się z cienkiego drucika z łatwo topliwego materiału (metalu), zamkniętego w obudowie izolacyjnej. Bezpieczniki wykonane są na różne natężenia prądu, zależnie od przekroju przewodów, które mają ochraniać od przetężenia (tabl. II). W razie przekroczenia dopuszczalnego natężenia prądu, cienki drucik metalowy bezpiecznika stapia się i obwód elektryczny zostaje przerwany, w ten sposób nie dopuszcza się do przeciążenia przewodów.

Przykład 26.

Przewody elektryczne doprowadzające do mieszkania prąd o napięciu 110 V posiadają przekrój 1 mm². Na przewody te załączone są równolegle kuchenka o mocy 600 W i żelazko o mocy 500 W. Ile żarówek o mocy 55 W można załączyć na te przewody, by nie przekroczyć podanego w tabl. II dopuszczalnego natężenia prądu?

Według tabl. II natężenie prądu dla drutu o przekroju 1 mm^2 nie może przekraczać 11 A.

$$\text{Kuchenka pobiera prąd: } I = \frac{N_1}{U} = \frac{600}{100} = 5,46 \text{ A}$$

$$\text{Żelazko pobiera prąd: } I_2 = \frac{N_2}{U} = \frac{500}{110} = 4,54 \text{ A}$$

Oba odbiorniki pobierają prąd: $I_1 + I_2 = 5,46 + 4,54 = 10 \text{ A}$.

Aby nie przekroczyć 11 A, żarówki mogą tylko pobierać $11 - 10 = 1 \text{ A}$.

Ponieważ każda żarówka pobiera prąd:

$$I_3 = \frac{N_3}{U} = \frac{55}{110} = 0,5 \text{ A}$$

Można zatem załączyć tylko: $\frac{1}{0,5} = 2$ żarówki.

Zwrócić uwagę na zaznaczony na rys. 44 rozptyw prądów.

Przykład powyższy można również rozwiązać nie obliczając poszczególnych prądów, a tylko moce, mianowicie: aby z sieci 110 V nie pobierać prądu większego od 11 A, całe urządzenie nie może posiadać mocy większej niż: $N = I \cdot U = 110 \cdot 11 = 1210 \text{ W}$. Z tego na żarówki po obliczeniu mocy pobieranych przez kuchenkę i żelazko zostanie: $1210 - 600 - 500 = 110 \text{ W}$. Ponieważ każda żarówka pobiera 55 W, można załączyć: $\frac{110}{55} = 2$ żarówki.

Spadek napięcia i strata mocy w przewodach. Przekrój przewodników musi być dobierany nie tylko ze względu na ich grzanie, ale i na spadek napięcia, a co zatem idzie i na stratę mocy w przewodach. Jak wiemy spadek napięcia w przewodach równy jest iloczynowi prądu przez oporność przewodników ($I R$). Aby spadek napięcia był mały, iloczyn ten powinien być mały. Na wielkość prądu nie mamy wpływu, gdyż decyduje o nim moc odbiornika energii elektrycznej. Zatem możemy utrzymać mały spadek napięcia jedynie przez zastosowanie przewodów o małym oporze. Według wzoru $R = \rho \cdot \frac{l}{q}$ możemy to zrobić przez zastosowanie przewodów z materiału o małym oporze właściwym i dużym przekroju. Patrząc na tabl. I widzimy, że pominiawszy srebro z powodu jego wysokiej ceny, metalem najbardziej nadającym się na przewody jest miedź ze względu na jej małą oporność właściwą. Przy wyborze wielkości przekroju grają rolę względy gospodarcze. Chodzi mianowicie o kalkulację, co się bardziej opłaci, czy produkować więcej energii elektrycznej, tracąc bezużytecznie dużą jej część w cieńszych, a więc w tańszych przewodach, czy też tracić jej mniej, a za to włożyć większy kapitał w instalację grubszych przewodów. W miesz-

kaniowej instalacji elektrycznej dobór przekroju przewodów, ze względu na dopuszczalny spadek napięcia, normują specjalne przepisy.

Przykład 27.

Źródło energii elektrycznej o mocy 25 kW, przy napięciu na zaciskach 250 V, ma przesłać energię elektryczną na odległość 2,1 km miedzianymi przewodami o przekroju 150 mm². Jaki będzie spadek napięcia i straty mocy w przewodach? Jakie napięcie panować będzie na końcu linii (na odbiorniku) i jaka moc zostanie w rzeczywistości oddana odbiornikom energii (rys. 45)?

Ze źródła płynie prąd:

$$I = \frac{N}{U} = \frac{25000}{250} = 100 \text{ A}$$

Opór każdego przewodu doprowadzającego:

$$R_1 = R_2 = \rho \frac{l}{q} = 0,0178 \cdot \frac{2100}{150} = 0,25 \ \Omega$$

Spadek napięcia w każdym z przewodów:

$$U_1 = U_2 = I \cdot R_1 = I \cdot R_2 = 100 \cdot 0,25 = 25 \text{ V}$$

Spadek napięcia w obu przewodach:

$$U_1 + U_2 = 25 + 25 = 50 \text{ V}$$

Moc tracona w każdym z przewodów:

$$N_1 = N_2 = I \cdot U_1 = I \cdot U_2 = 100 \cdot 25 = 2500 \text{ W} = 2,5 \text{ kW}$$

Moc tracona w obu przewodach:

$$N_1 + N_2 = 2,5 + 2,5 = 5 \text{ kW}$$

Napięcie na odbiorniku:

$$U_3 = U - (U_1 + U_2) = 250 - 50 = 200 \text{ V}$$

Moc oddana odbiornikowi:

$$N_3 = N - (N_1 + N_2) = 25 - 5 = 20 \text{ kW}$$

Obliczmy ten sam przykład w założeniu, że źródło posiada na zaciskach napięcie 1250 V a nie 250 V.

Analogicznie do rozwiązania poprzedniego będzie obecnie:

$$I = \frac{25000}{1250} = 20 \text{ A}$$

$$U_1 = U_2 = I \cdot R_1 = I \cdot R_2 = 20 \cdot 0,25 = 5 \text{ V}$$

$$U_1 + U_2 = 5 + 5 = 10 \text{ V}$$

$$N_1 = N_2 = I \cdot U_1 = I \cdot U_2 = 20 \cdot 5 = 100 \text{ W}$$

Moc tracona w obu przewodnikach:

$$N_1 + N = 100 + 100 + 200 \text{ W} = 0,2 \text{ kW}$$

Napięcie na odbiorniku:

$$U_3 = U - (U_1 + U_2) = 1250 - 10 = 1240 \text{ V}$$

Moc oddana odbiornikowi:

$$N_3 = N - (N_1 + N_2) = 25 - 0,2 = 24,8 \text{ kW}$$

Uwaga: Z porównania otrzymanych wyników widać od razu, jak doniosłe znaczenie przy przesyłaniu energii elektrycznej na odległość posiada dla pomniejszenia strat w przewodach stosowanie wysokich napięć. Dlatego tak często spotyka się w praktyce linie przesyłowe wysokiego napięcia.

Przykład 28.

Jaki przekrój powinny posiadać przewody elektryczne w instalacji na 220 V o długości 50 m, jeśli dopuszczalny spadek napięcia ma nie przekraczać 3,5%, a pobór prądu wszystkich odbiorników energii elektrycznej przewiduje się nie większy niż 20 A?

$$3,5\% \text{ od } 220 \text{ V daje spadek napięcia } U_1 = 220 \cdot \frac{3,5}{100} = 7,7 \text{ V}$$

Spadek ten przy 20-ampierowym prądzie wystąpi na oporności

$$R_1 = \frac{U_1}{I} = \frac{7,7}{20} = 0,385 \Omega$$

Ze wzoru $R_1 = \rho \frac{l}{q_1}$ dla przewodów miedzianych ($\rho = 0,0178$),

uwzględniając, że $l = 2 \cdot 50 = 100 \text{ m}$ otrzymamy szukany przekrój:

$$q = \rho \frac{l}{R_1} = 0,0178 \cdot \frac{100}{0,385} = 4,6 \text{ mm}^2$$

Stosując z tabl. II przekroje znormalizowane, mamy przewód 6 mm². Ze względu na grzanie przewodów ten jest również odpowiedni, gdyż dopuszczalne przepisami natężenie prądu dla tego przekroju (31 A) nie przekracza przewidzianego przez nas (20 A).

Ciepłne przyrządy pomiarowe. Ciepłe działanie prądu elektrycznego zastosowano w przyrządzie do pomiaru natężenia prądu elektrycznego, w tzw. amperomierzu ciepłym (rys. 46). Pod wpływem prądu, skutkiem ogrzewania, wydłuża się drucik o bardzo małej oporności. Środek tego drucika naciągany jest sprężyną poprzez rolkę, na której umocowana jest wskazówka. W ten sposób stopień wydłużenia drucika, a więc wychylenie wskazówki, zależy od wielkości natężenia prądu płynącego przez przyrząd. Skala przyrządu nie jest równomierna, odstępy

na początku skali są małe, dalej coraz większe. Jest to tzw. skala kwadratowa. Pochodzi to stąd, że jak wiemy ciepło, a więc i wydłużenie drucika, zależne jest od kwadratu prądu:

$$(Q = 0,239 \cdot I^2 \cdot R \cdot t)$$

Ogrzanie drucika jest zupełnie niezależne od kierunku prądu, może być on taki, jak podany na rysunku 46, może być i odwrotny. Dlatego amperomierz ten nadaje się do pomiarów zarówno natężenia prądu stałego jak i zmiennego (o prądzie zmiennym zob. rozdział VII).

Uwaga: Wszelkie urządzenia przeznaczone do odbioru energii elektrycznej, a wykorzystujące cieplne działanie prądu elektrycznego, mogą być stosowane zarówno na prąd stały, jak i na prąd zmienny.

ROZDZIAŁ III

ELEKTROSTATYKA

Elektrostatyka jest to dział elektrotechniki omawiający zjawiska elektryczne, które zachodzą w ciałach i ich otoczeniu, gdy nie ma przepływu elektronów. W elektrostatyce nie spotykamy się więc z prądem elektrycznym i z ściśle mu towarzyszącym pojęciem oporności elektrycznej.

Pole elektryczne. W rozdziale I poznaliśmy zjawisko przyciągania się i odpychania dwóch ciał, zależnie od tego, czy są naładowane różnoimiennie, czy jednoimiennie (rys. 4). Ciała te mimo, że nie są ze sobą połączone żadnym materialnym przewodem i są rozdzielone pustą przestrzenią, oddziałują jednak na siebie z siłą przyciągającą lub odpychającą. Jeśli te dwa naładowane ciała oddalimy daleko od siebie, nie zaobserwujemy już zjawiska ich wzajemnego na siebie działania.

Istnieje więc jakaś przestrzeń wokół ciała naładowanego, w której to elektryczne zjawisko zachodzi, a które praktycznie zanika w miarę oddalania się od niego.

Wspomniana przestrzeń wokół ciała naładowanego nazywa się polem elektrycznym. Pole elektryczne da się przedstawić tzw. liniami sił, których mniejsze lub większe zagęszczenie (rys. 47 i 48) stanowi o wielkości siły z jaką te ciała oddziałują, czyli o natężeniu pola elektrycznego.

O ilości linii sił, czyli o natężeniu pola, stanowi ilość wolnych elektronów, czyli ładunek elektryczny, jakie to ciało posiada. Natężenie pola w otoczeniu ciała na rys. 47 jest mniejsze niż natężenie pola w otoczeniu ciała na rys. 48, dlatego, że posiada ono mniej elektronów czyli mniejszy ładunek elektryczny. Natężenie pola, jak to wynika również z rysunków 47 i 48, jest największe przy samym ciele i maleje w miarę oddalania się od niego.

Kierunek przebiegu linii sił przedstawia również obrazowo odpychające lub przyciągające oddziaływanie naelektryzowanych ciał na siebie.

Influencja elektryczna. Jeśli do ciała A naładowanego ujemnie zbliżymy obojętne elektrycznie ciało B, to znajdujące się w nim elektrony, na skutek odpychającej siły ujemnie naelektryzowanego ciała A, zechcą odsunąć się od niego jaknajdalej (rys. 50). Strona ciała B zwrócona do A będzie uboga w elektrony; a więc dodatnia elektrycznie, zaś strona przeciwna z powodu nagromadzonych w niej wolnych elektronów, będzie posiadała charakter elektrycznie ujemny. Gdy wolne elektrony ciała B znajdą jakąś drogę przepływu, zechcą odsunąć się jak najdalej

od ciała A. Dlatego też jeśli ciało B połączymy przewodnikiem np. z ziemią, wolne elektrony spłyną do niej (rys. 51).

Gdy teraz przerwiemy połączenie z ziemią, to nawet po usunięciu ciała A, ciało B pozostanie dodatnio naelektryzowane, a to dzięki ubytkowi wolnych elektronów. Zjawisko elektryzowania ciał przez wprowadzenie ich w obszar działania pola elektrycznego nazywamy *influcją elektryczną*.

Pojemność elektryczna. Wyobraźmy sobie dwie metalowe kule o różnej wielkości ujemnie naładowane, ale posiadające tę samą ilość wolnych elektronów, czyli ten sam ładunek elektryczny, który oznaczmy literą Q (rys. 52). Każda z tych kul znajduje się w przestrzeni wolnej od obcego pola elektrycznego, czyli jest odosobniona.

Ponieważ kule posiadają ten sam ładunek elektryczny, więc z każdej z nich wychodzi ta sama liczba linii sił. Ponieważ jednakże kula A jest mniejsza od kuli B, na powierzchni jej zagęszczenie linii sił jest większe, a więc panuje tam większe natężenie pola.

W rozdz. I określiliśmy napięcie elektryczne jako ciśnienie wolnych elektronów starających się odpychać od siebie. Oczywiście jest, że ciśnienie elektronów, czyli napięcie na powierzchni kuli A jest większe od napięcia na powierzchni kuli B, gdyż w kuli A ta sama liczba elektronów została skupiona na mniejszej powierzchni. Gdybyśmy kulę A zrównali co do wielkości z kulą B, natężenia pól i napięcia na powierzchniach obu kul byłyby jednakowe. Widzimy więc, że między ilością elektronów, czyli ładunkiem elektrycznym, a napięciem na powierzchni kuli istnieje zależność uwarunkowana wielkością kuli. Wielkość ta pojęta elektrycznie, nazywa się pojemnością elektryczną danego ciała i równa się stosunkowi ilości elektronów Q , znajdujących się na kuli, do napięcia U , panującego na niej:

$$\text{pojemność} = \frac{\text{ilość elektronów}}{\text{napięcie}}; \quad C = \frac{Q}{U} \dots \dots \dots (16)$$

Farad. Jednostką pojemności elektrycznej jest Farad (oznacza się: F).

Jest to pojemność kuli, na której ilość elektronów jednego Coulomba wywołuje napięcie jednego Wolta:

$$\text{Farad} = \frac{\text{Coulomb}}{\text{Wolt}}$$

Jest to jednostka pojemności bardzo duża, dlatego też w praktyce stosuje się jednostki mniejsze:

$$\text{Mikrofarad} = (\mu \text{ F}) \quad 1 \mu \text{ F} = \frac{1}{1000000} \text{ F} = 10^{-6} \text{ F}$$

$$\text{Pikofarad} = (\text{pF} \text{ lub } \mu\mu \text{ F}) \quad 1 \text{ pF} = \frac{1}{1000000} \mu \text{ F} = 10^{-6} \text{ F}$$

O olbrzymiej wartości 1 F świadczy, że pojemność taką posiada kula o promieniu 9,000,000 km. Wystarczy dodać, że pojemność naszej kuli ziemskiej wynosi tylko $\frac{708}{1000000}$ F czyli 708 μ F

Z wielkości promienia kuli odpowiadającej 1 F otrzymać można jeszcze jedną w praktyce używaną jednostkę pojemności elektrycznej, mianowicie centymetr, przyczem:

$$\begin{aligned} \text{pojemność 1 cm} &= 1,11 \text{ pF} \\ \text{lub 1 pF} &= 0,9 \text{ cm.} \end{aligned}$$

Kondensator. Pojemność kuli metalowej, lub każdego innego przewodnika o innym kształcie, nie jest wielkością stałą lecz zmienia się w sąsiedztwie innych przewodników i zależy od właściwości ośrodka, w którym się dany przewodnik znajduje. Jeśli do płytki metalowej A naładowanej ładunkiem Q zbliżymy uziemioną płytkę B, to dzięki zjawisku influencji, płytka B zostanie naładowana dodatnio. Skutkiem sił przyciągających płytka B zwiąże część elektronów płytki A. Napięcie na płytce A spadnie pomimo, że ładunek na niej pozostał ten sam. Aby spowrotem otrzymać to samo napięcie, trzeba by doprowadzić do płytki A nowe elektrony. Skutkiem więc obecności płytki B, wzrosła pojemność płytki A. Pojemność ta będzie tym większa, im bardziej będziemy zbliżać płytki do siebie. O pojemności decyduje tu nie wielkość samej płytki A, lecz wielkość i wzajemna odległość obu płytek. Układ taki złożony z dwóch metalowych płyt, posiadających wspólną pojemność nazywamy kondensatorem płaskim. Jeśli utrzymując niezmienny odstęp między płytkami, wsuniemy między nie płytę szklaną, stwierdzimy, że napięcie na płytce A znowu spadnie. Aby go doprowadzić do uprzedniej wielkości, znów musimy dostarczyć nowe ładunki płytce A. Stwierdzamy więc, że pojemność kondensatora wzrasta na skutek zastąpienia płytą szklaną powietrza znajdującego się uprzednio między płytkami. Zastępując szkło innymi materiałami izolacyjnymi otrzymamy coraz to inne pojemności kondensatora. Ostatecznie dochodzimy do wniosku, że pojemność kondensatora zależy:

- 1) Od wielkości płytek — im większe płytki, tem większa pojemność.
- 2) Od odstępu między płytkami — im mniejszy odstęp, tem większa pojemność.
- 3) Od rodzaju materiału izolacyjnego między płytkami, który w tym wypadku nazywa się dielektrykiem.

Matematycznie pojemność kondensatora płaskiego wyraża się wzorem:

$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi d} \dots \dots (17)$$

gdzie C otrzymamy w cm gdy:

S — powierzchnia płytki w cm^2

d — odstęp między płytkami w cm

ϵ — charakterystyczna dla każdego dielektryka liczba zwana stałą dielektryczną (tab. III) (ϵ — czytaj: epsylon).

Przykład 29.

Jaką pojemność w pF posiada kondensator powietrzny złożony z dwóch płyt o powierzchni 50 cm^2 , oddalonych od siebie o 1 mm ? Z tabl. III znajdziemy, że powietrze posiada stałą dielektryczną $\epsilon = 1$. Uwzględniając, że $1 \text{ mm} = 0,1 \text{ cm}$, otrzymamy:

$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi d} = \frac{1 \cdot 50}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,1} = 39,8 \text{ cm}$$

ponieważ pojemność $1 \text{ cm} = 1,11 \text{ pF}$, otrzymamy:

$$C = 39,8 \cdot 1,11 = 44 \text{ pF}$$

Przykład 30.

Jaką powierzchnię płyt S musi posiadać kondensator o pojemności $C = 1 \mu\text{F}$, jeśli za dielektryk użyto papieru o grubości $d = 0,5 \text{ mm}$ i o stałej dielektrycznej $\epsilon = 4$?

$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi d}; \text{ stąd powierzchnia płyt: } S = \frac{C \cdot 4\pi d}{\epsilon}$$

We wzór musimy pojemność C wstawić w cm, przeliczamy więc:

$$1 \text{ pF} = \frac{1}{1000000} \mu\text{F} = 0,9 \text{ cm stąd:}$$

$$C = 1 \mu\text{F} = 0,9 \cdot 10^6 \text{ cm}$$

d musimy wstawić do wzoru w cm, a więc:

$$d = 0,5 \text{ mm} = 0,05 \text{ cm}$$

Ostatecznie otrzymamy powierzchnię płyty:

$$S = \frac{C \cdot 4\pi d}{\epsilon} = \frac{0,9 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 0,05}{4} 14 \cdot 10^4 \text{ cm}^2 = 14 \text{ m}^2$$

Do wyrobu dużych kondensatorów nie używa się oczywiście tak wielkich płyt, lecz stosuje się dwa długie i wąskie paski cynfolii odpowiadające żądanej powierzchni, oddzielone taśmą papieru jako dielektrykiem i zwinięte razem w rolkę.

Równoległe połączenie kondensatorów. Kondensatory można łączyć ze sobą równoległe lub szeregowo. Wspólna, czyli zastępcza pojemność układu kondensatorów połączonych równoległe, jest równa sumie pojemności poszczególnych kondensatorów. Pojemność dwóch kondensatorów połączonych równoległe (rys. 54 a) wynosi:

$$C = C_1 + C_2 \dots \dots \dots (18)$$

Pojemność trzech kondensatorów połączonych równoległe (rys. 54 b):

$$C = C_1 + C_2 + C_3 \dots \dots \dots (19)$$

Przy kondensatorach załączonych równoległe napięcia na wszystkich kondensatorach są sobie równe.

Szeregowe połączenie kondensatorów. Jak przy równoległym łączeniu oporności, oporność zastępcza była mniejsza od najmniejszej z oporności, tak całkowita pojemność układu szeregowo połączonych kondensatorów jest mniejsza od pojemności najmniejszego z kondensatorów.

Pojemność dwóch kondensatorów połączonych w szereg (rys. 55 a) wynosi:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \text{ czyli } C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \dots (20)$$

Pojemność trzech kondensatorów połączonych w szereg (rys. 55 b):

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

$$\text{czyli } C = \frac{C_1 \cdot C_2 \cdot C_3}{C_1 \cdot C_2 + C_2 \cdot C_3 + C_3 \cdot C_1} \dots (21)$$

Przy szeregowym połączeniu kondensatorów napięcie nie rozkłada się na nich równomiernie. Pod największym napięciem znajduje się kondensator o najmniejszej pojemności. Ogólnie mówiąc, napięcia rozłożone na kondensatorach są odwrotnie proporcjonalnie do ich pojemności.

Przykład 31.

Jaką jest całkowita pojemność trzech równolegle połączonych kondensatorów o pojemnościach:

$$C_1 = 300 \text{ pF}, \quad C_2 = 0,01 \text{ } \mu\text{F} \text{ i } C_3 = 5000 \text{ cm}$$

Przed dodaniem musimy wszystkie pojemności sprowadzić do wspólnej jednostki np. pF:

$$C_1 = 300 \text{ pF}; \quad C_2 = 0,01 \text{ } \mu\text{F} = 10000 \text{ pF};$$

$$C_3 = 5000 \text{ cm} = 5000 \cdot 1,11 = 5550 \text{ pF}$$

Całkowita pojemność będzie:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 = 300 + 10000 + 5550 = 15850 \text{ pF} = 0,01585 \text{ } \mu\text{F}$$

Przykład 32.

Jaka jest całkowita pojemność układu kondensatorów podanego na rys. 56?

Pojemność kondensatorów C_3 i C_4 załączonych równolegle będzie:

$$C_{34} = C_3 + C_4 = 2 + 3 = 5 \text{ } \mu\text{F}$$

Mamy teraz układ trzech kondensatorów C_1 , $C_{3,4}$, C_2 połączonych w szereg.

Całkowita pojemność będzie:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_{34}} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{10} + \frac{1}{5} + \frac{1}{20} = \frac{7}{20}$$

$$\text{a więc } C = \frac{20}{7} = 2,86 \mu\text{F}$$

Ładowanie kondensatora. Wyobraźmy sobie, że do kondensatora o pewnej pojemności załączamy źródło prądu stałego (rys. 57). Elektryony znajdujące się pod ciśnieniem na ujemnym biegunie źródła, uzyskawszy w chwili załączania wolną drogę, podążą do płytki A. W tym czasie z płytki B, początkowo obojętnej elektrycznie, znajdujące się w niej wolne elektrony zostaną przyciągnięte przez ssące działanie dodatniego bieguna źródła prądu elektrycznego.

Otrzymujemy w obwodzie przepływ elektronów, czyli prąd elektryczny. Prąd ten jest jednak bardzo krótkotrwały i zanika z chwilą, gdy pomiędzy wielkościami: napięciem U , pojemnością kondensatora C i ilością elektronów, czyli ładunkiem elektrycznym Q na kondensatorze, spełni się znana nam już zależność $C = \frac{Q}{U}$

Ten krótkotrwały prąd napełniający kondensator elektronami nazywamy prądem ładowania kondensatora. Wielkość jego zależy od napięcia źródła, od jego oporności wewnętrznej i od oporu przewodów doprowadzających. W chwili załączenia, prąd ładowania jest równy prądowi zwarcia obwodu (jakby kondensatora nie było) i maleje jednak w miarę ładowania się kondensatora. Czas trwania prądu jest tem dłuższy, im większy jest kondensator i większy opór obwodu. Z chwilą pełnego naładowania, napięcie pomiędzy płytkami kondensatora jest równe napięciu na zaciskach źródła i prąd elektryczny w obwodzie przestaje płynąć. Dochodzimy więc do ważnego wniosku, że jeśli w obwodzie elektrycznym prądu stałego załączony jest kondensator, stały prąd elektryczny nie płynie w takim obwodzie.

Wyładowanie kondensatora. Mimo, że naładowany kondensator odłączymy od źródła prądu stałego, to na jego płytkach, na skutek znajdujących się tam ładunków elektrycznych, stale panować będzie poprzednie napięcie. Z chwilą jednak, gdy obie płytki ze sobą połączymy przewodem, nastąpi przepływ elektronów z płytki A do ubogiej w elektrony płytki B. Otrzymamy znów krótkotrwały przepływ prądu, w tym wypadku zwany prądem wyładowania kondensatora. Będzie on płynął tak długo, aż gęstość elektronów na obu płytkach się zrówna, czyli aż napięcie między nimi nie spadnie do zera. Mamy tu ten sam przebieg, jak na rys. 5, przedstawiającym przepływ prądu między dwoma ciałami różnoimiennie naładowanymi.

Wytrzymałość materiałów izolacyjnych na przebicie. Gdybyśmy napięcie źródła na jakie jest załączony kondensator (rys. 57) zaczęli podwyższać, wówczas coraz więcej elektronów dopływałoby do płytki A, coraz większe byłoby na niej ich ciśnienie i na kondensatorze coraz większe napięcie.

Wyobraźmy sobie butelkę. Butelka ta, zależnie od swej pojemności, może pomieścić pewną ilość gazu. Pod zwiększonym ciśnieniem da się

jednak wprowadzić do butelki coraz większe jego ilości. Wytrzymałość butelki ma jednak swe granice. Gdy ciśnienie przekroczy pewną wartość, butelka pęknie. Podobnie rzecz się ma z dielektrykiem w kondensatorze i innymi materiałami izolacyjnymi, znajdującymi się pod napięciem. Posiadają one pewną wytrzymałość elektryczną na przebicie.

Gdy napięcie U na kondensatorze (rys. 58) przekroczy pewną charakterystyczną dla danego dielektryka wartość, nastąpi jego przebicie. Elektrony nagromadzone na płytce A będą pod tak dużym ciśnieniem i siłą ich chęci dostania się do płytki B ubogiej w elektrony będzie tak wielka, że nastąpi tzw. wyładowanie elektryczne, w postaci iskry. Iskra przebija stojący na jej drodze dielektryk i powoduje jego uszkodzenie.

Tabl. III oprócz stałych dielektrycznych pewnych materiałów izolacyjnych, podaje dla niektórych z nich ich wytrzymałość elektryczną na przebicie w kV/cm . Liczba ta oznacza, że np. w kondensatorze powietrznym przebicie i wyładowanie między płytkami kondensatora, odległymi od siebie o 1 cm , nastąpi przy napięciu 30000 V .

Pojemność przewodów. Nietylko kondensator posiada pojemność. Pojemność posiada każdy metalowy przedmiot względem innego w jego sąsiedztwie, jak też względem ziemi. Dielektrykiem jest tu oczywiście powietrze. Przewody elektryczne zawieszane na słupach posiadają pojemność tak pomiędzy sobą, jak i w stosunku do ziemi. Nadawcza lub odbiorcza antena radiowa posiada również pojemność względem ziemi. W razie potrzeby pojemności te dają się zawsze obliczyć lub zmierzyć.

ROZDZIAŁ IV

ZJAWISKA ELEKTROCHEMICZNE

Elektroliza. Wiemy z rozdz. I, że przewodzenie prądu elektrycznego w przewodnikach II kategorii czyli w cieczach i gazach, zawdzięczamy przenoszeniu elektronów za pomocą wędrówki jonów dodatnich i ujemnych. Weźmy naczynie napełnione np. rozwodnionym kwasem siarkowym, którego wzór chemiczny jest H_2SO_4 , gdzie H oznacza wodór, S — siarkę, O — tlen.

Zanurzymy w roztworze kwasu siarkowego płyty metalowe, odporne na działanie kwasu np. platynowe i połączmy je ze źródłem prądu elektrycznego (rys. 59).

W tak powstałym obwodzie elektrycznym popłynie prąd a to w skutek rozkładu kwasu siarkowego na dwie części składowe: na ubogi w elektrony, a więc dodatni jon wodoru (H_2), który podąży do platynowej płytki ujemnej, i na bogaty w elektrony a więc ujemny jon reszty kwasowej (SO_4), który podąży do płytki dodatniej. Dodatni jon wodoru pobierze z płytki ujemnej brakujący mu elektron, stanie się przez to obójtny elektrycznie i przy płytce tej pozostanie. Ujemny jon reszty kwasowej odda swój nadmierny elektron ubogiej w elektrony płytce dodatniej i również przy niej pozostanie. W ten sposób dzięki przenoszeniu elektronów przez resztę kwasową SO_4 do płytki dodatniej i dzięki pochłanianiu ich z płytki ujemnej przez wodór H_2 , obieg prądu zostaje utrzymany.

Anoda, katoda. Płytki, w naszym wypadku platynowe, do których zdążają jony, nazywamy elektrodami. Elektroda załączona na biegun dodatni nazywa się anodą, a załączona na biegun ujemny katodą.

Elektrolit. Płyn, w tym doświadczeniu kwas siarkowy, w którym są zanurzone elektrody i który dzięki rozkładowi chemicznemu przewodzi prąd elektryczny, nazywa się elektrolitem, całe zaś zjawisko i proces rozkładu elektrolizą.

Galwanizacja. Jeślibyśmy zamiast kwasu siarkowego jako elektrolitu użyli wodnego roztworu jakiejś soli metalu np. azotanu srebra $AgNO_3$ gdzie: Ag — srebro, N — azot, O — tlen, wówczas nastąpiłby jego rozkład na ujemny jon reszty kwasowej NO_3 zdążający do anody i na dodatni jon srebra Ag. Jony srebra podążyłyby do płytki katodowej i osadzając się na niej pokryłyby ją warstwą srebra. Gdybyśmy jako katody użyli nie platynowej płytki a jakiegoś innego przedmiotu metalowego, pokryje się on również warstwą srebra czyli posrebrzy się.

Używając zamiast azotanu srebra soli innych odpowiednich metali, możemy rozmaite metalowe przedmioty niklować, chromować, miedziować itd. Ten sposób pokrywania przedmiotów wykonanych z nieszlachetnego zazwyczaj metalu, drogą elektrolizy, warstwą metalu szlachetnego, nazywamy galwanizacją. Ponieważ po dłuższym procesie galwanizacyjnym nastąpiłby w elektrolicie ubytek metalu, któryby należało często uzupełniać, robi się anodę nie z odpornej na działanie kwasu platyny, ale z tego metalu, którym galwanizujemy. Reszty kwasowe, zdążające do anody, zwołna ją rozpuszczają, wyrównując w ten sposób ubytek metalu w roztworze (rys. 60).

Naczynie, w którym następuje galwanizacja, musi być z materiału nieprzewodzącego, np. z kamienia lub szkła. W całym procesie galwanizacji dużą rolę odgrywa temperatura roztworu, odległość elektrod, napięcie i natężenie prądu, jak również czystość chemikalii. Dla trwałości i dokładności galwanizacji ważnym jest, by przedmiot galwanizowany był zupełnie czysty i dlatego przed procesem galwanizacji poddaje się go dokładnemu oczyszczeniu, wypolerowaniu, odtłuszczeniu itd.

Galvano-plastyka. Galwanizuje się zawsze przedmioty metalowe, a więc przewodzące prąd elektryczny. Chcąc pokryć warstwą metalu przedmioty nieprzewodzące, wykonane np. z gipsu, szkła, drzewa itp., należy je przed właściwą galwanizacją pokryć warstewką przewodzącą prąd np. przez natarcie lub rozpylenie na ich powierzchni pyłu grafitowego. Sposób ten zwie się galwanoplastyką i ma zastosowanie przede wszystkim w sztuce artystycznej.

Elektrolityczne otrzymywanie czystych metali. W metalurgii wykorzystuje się proces elektrolizy w celu otrzymania chemicznie czystych metali. Na tej drodze uzyskuje się właśnie miedź, która ma tak wielkie zastosowanie w elektrotechnice. Nazywa się ona wówczas: miedzią elektrolityczną.

W tym celu wykonuje się katodę z cienkiej blachy z szlachetnej miedzi. Miedź będąca składnikiem elektrolitu osadza się na katodzie, tworząc z niej duże płyty miedziane, które podlegają następnie dalszej obróbce, jak prasowaniu, walcowaniu, ciągnięciu itp. W podobny sposób otrzymuje się aluminium elektrolityczne.

Ogniwa elektryczne mokre. Jeśli do wodnego roztworu kwasu siarkowego (H_2SO_4) włożymy dwie elektrody, z których jedna jest miedziana (Cu), druga cynkowa (Zn), to urządzenie takie, skutkiem zachodzących przemian chemicznych, stanie się źródłem napięcia elektrycznego. Miedź będzie biegunem dodatnim, cynk zaś biegunem ujemnym. Napięcie na zaciskach takiego ogniwa mokrego wynosi około 1 V. Z chwilą załączenia oporności na zaciskach ogniwa, popłynie w obwodzie prąd elektryczny, którego wielkość uwarunkowuje prawo Ohma (rys. 61). Jesteśmy tu świadkami przemiany materii chemicznej w elektryczną. Naskutek zachodzących reakcji chemicznych, jak wiązanie się reszty kwasowej SO_4 z cynkiem i wydzielaniem się wodoru na płycie miedzianej

(patrz rys. 61), napięcie na zaciskach ogniwa, po względnie krótkiej pracy, spada z wartości 1 wolta do zera.

Istnieje cały szereg rodzajów ogniw, o rozmaitych nazwach pochodzących od nazwisk ich wynalazców, którzy starali się rozmaitymi sposobami oraz doбором odpowiednich metali i elektrolitów przedłużyć prace ogniw, względnie powiększyć ich SEM.

Ponieważ ogniwa elektryczne mokre wyszły dziś prawie całkowicie z użycia, nie będziemy ich omawiali.

Ogniwa elektryczne suche. Większe zastosowanie mają w praktyce ogniwa suche, do których przedewszystkiem należy bateryjka lampki kieszonkowej oraz baterie anadowe do odbiorników radiowych. Zasada działania ich jest taka sama jak w ogniwach mokrych. Różnica polega jedynie na tym, że zamiast płynnego elektrolitu posiadają one nasiąknięte nim ciało stałe, utrzymujące dość długo wilgoć, jak np. żelatyna, opłuki drzewne. Powszechnie używanym suchym ogniwem jest ogniwo podane na rys. 62. Kubek cynkowy stanowi jedną elektrodę (biegun ujemny), węgiel zaś drugą (biegun dodatni). Elektrolitem jest zgęszczony roztwór salmiaku (NH_4Cl). Pomiedzy salmiakiem a właściwą elektrodą węglową znajduje się worek wypełniony mieszaniną dwutlenku manganu (MnO_2) z węglem. Zadaniem tej mieszaniny jest zapobieganie osadzaniu się wodoru na elektrodzie węglowej, gdyż to osadzanie się spowodowałoby w szybkim czasie zmalenie napięcia ogniwa z powodu zahamowania przepływu prądu elektrycznego. Dwutlenek manganu, łącząc się bardzo chętnie z wodorem, nie dopuszcza do jego nagromadzenia się. SEM takiego ogniwa wynosi 1,5 V zaś opór wewnętrzny od 0,1 do 0,4 Ω zależnie od wielkości i konstrukcji. Płaska bateryjka lampki kieszonkowej składa się z trzech ogniw suchych połączonych szeregowo. Napięcie bateryjki jest więc równe 4,5 V (rys. 63). Radiowa bateria anadowa o napięciu 90 V będzie się składała z 60 suchych ogniw połączonych w szereg. Ogniwo suche po pewnym okresie czasu pracy, skutkiem zaszłych w nim reakcji chemicznych, przestaje być źródłem energii elektrycznej czyli wyładowuje się, czego oznaką jest zmniejszanie się napięcia na jego zaciskach. Wyładowane ogniwa suche nie nadają się do użytku i naprawy.

A k u m u l a t o r. W akumulatorze jest inaczej. Wyładowany akumulator, poddany działaniu stałego prądu elektrycznego, staje się sam źródłem energii elektrycznej. Przy ładowaniu akumulatora następuje przemiana materii elektrycznej na chemiczną, zaś przy jego wyładowaniu przemiana odwrotna. Jesteśmy tu świadkami odwracalności zjawiska, z czym często spotykamy się w elektrotechnice. Jeśli przyjrzymy się świeżo naładowanemu akumulatorowi, zauważymy, że jego elektrodami są dwa rodzaje płyt, zanurzonych w wodnym roztworze kwasu siarkowego.

Płyta dodatnia zawiera dwutlenek ołowiu (PbO_2) i posiada zabarwienie brunatne, podczas gdy płyta ujemna posiada srebrno-szare zabarwienie czystego ołowiu (Pb). W ten sposób naładowany akumulator posiada dwie elektrody z różnych materiałów.

Wyładowywanie akumulatora. W czasie wyładowywania akumulatora (rys. 64 a) prąd płynie jak w każdym innym ogniwie, mianowicie od bieguna dodatniego (płyta z PbO_2) przez oporność odbiornika energii elektrycznej do bieguna ujemnego (płyta Pb). Wewnątrz zaś akumulatora prąd płynie poprzez elektrolit od płyty ujemnej do dodatniej.

Zachodzący przy wyładowaniu proces chemiczny zamienia zarówno dwutlenek ołowiu płyty dodatniej jak i ołów płyty ujemnej na siarczan ołowiu (PbSO_4) i napięcie akumulatora powoli maleje.

Obserwując krzywą wyładowania akumulatora (rys. 55), widzimy, że świeżo naładowany akumulator posiada napięcie na zaciskach 2,1 V. Napięcie to spada początkowo dość szybko do wartości 1,9 V, utrzymuje się czas dłuższy na tym poziomie, a następnie znów szybko opada. Przy napięciu 1,8 V, należy zaprzestać czerpania energii elektrycznej z akumulatora, gdyż dalsze wyładowanie spowoduje jego uszkodzenie. Napięcie na akumulatorze należy mierzyć pod obciążeniem (w czasie pracy), gdyż w biegu jałowym akumulator nawet wyładowany będzie wykazywał około 2,0 V.

Ładowanie akumulatora. Przy ładowaniu akumulatora (rys. 64 b) skutkiem przepływu prądu elektrycznego w kierunku odwrotnym niż przy wyładowywaniu zachodzą w nim reakcje chemiczne, które z powrotem doprowadzają do stanu pierwotnego pokryte siarczanem ołowiu płyty, czyli dodatnią na dwutlenek ołowiu, a ujemną na ołów.

Akumulator można ładować tylko prądem stałym, przyczem prąd ładowania nie powinien przekraczać wartości charakterystycznej dla danego akumulatora, a podanej przez firmę.

W tym celu, jeśli źródło, z którego czerpiemy prąd ładowania, ma za duże napięcie, należy w szereg między nie a ładowany akumulator włączyć odpowiedniej wielkości opór dławiaczy.

Przy ładowaniu należy zwrócić uwagę, by dodatni biegun źródła łączyć z dodatnim biegunem akumulatora, a biegun ujemny z ujemnym. Po rozpoczęciu ładowania, napięcie na akumulatorze rośnie szybko do 2,14 V, poczem wolniej do 2,4 V. Koniec ładowania poznajemy po silnym gazowaniu obu płyt, przyczem napięcie na akumulatorze wynosi wówczas około 2,7 V. Po wyłączeniu prądu ładowania napięcie akumulatora spada natychmiast do 2,3 V, a nieco później do 2,1 V. W praktyce dwuwoltowy akumulator składa się nie z jednej płyty ujemnej i jednej dodatniej, jak to wskazuje rys. 64, lecz celowo z dwóch płyt ujemnych i jednej dodatniej, aby przemiany chemiczne na płycie dodatniej następowały na obu jej powierzchniach (rys. 66).

Każdy akumulator, zależnie od wielkości płyt, ma określoną pojemność w amperogodzinach (Ah).

Liczba ta podaje, przez ile godzin można go wyładowywać danym prądem. Jeśli np. jakiś akumulator posiada pojemność 36 Ah, znaczy

to, że można z niego przez przeciąg 36 godzin czerpać prąd 1 A lub przez przeciąg 72 godz. czerpać prąd $\frac{1}{2}$ A. Nie jest to jednak ściśle, gdyż pojemność akumulatora jest większa gdy go się wyładowuje prądem mniejszym. W celu uzyskania dużej pojemności akumulatora, nie robi się płyt o wielkich rozmiarach, lecz łączy się kilka jednoimiennych płyt z sobą (rys. 67).

Każdy akumulator posiada przepisana przez firmę maksymalną dopuszczalną dla niego wielkość prądu wyładowania, której nie należy nigdy przekraczać, by akumulatora nie psuć. Podawana przez firmę pojemność akumulatora w Ah odpowiada właśnie maksymalnemu prądowi wyładowania. Przy mniejszym prądzie wyładowania pojemność jego, jak już powiedziano, będzie większa.

W celu otrzymania z akumulatorów większego napięcia niż 2 V, łączy się je szeregowo w baterie akumulatorów. Akumulator np. 4 voltowy składa się z dwóch akumulatorów szeregowo połączonych. Oporność wewnętrzna akumulatora jest bardzo mała, zależy od wielkości płyt i wynosi 0,01—0,001 Ω . Należy więc unikać zwarcia akumulatora, gdyż płynący wówczas olbrzymi prąd uszkodzi jego płyty (patrz przykład 14).

Akumulator choćby był nieużywany, należy co 1 do 2 miesięcy doładowywać, a w żadnym razie nie wolno zostawić go wyładowanym nawet przez okres paru dni.

Akumulator żelazo-niklowy (Edisona). Żelazo-nikłowy akumulator Edisona posiada jedną elektrodę z żelaza (—), drugą z niklu (+), a jako elektrolit wodorotlenek potasu (KOH).

Napięcie jego wynosi średnio 1,2 V.

Zaletą jego w stosunku do akumulatora ołowianego jest 3 razy lżejsza waga, nieczułość na prawie całkowite wyładowanie i możliwość pozostawienia go w stanie wyładowanym.

Wadą natomiast jest niestety jego duża cena.

ROZDZIAŁ V

MAGNETYZM

Słowo magnes i magnetyzm nie jest nam obce. Każdy z nas widział magnes i wie, że posiada on własność przyciągania kawałków żelaza. Już dawno temu starożytni Grecy, a także Chińczycy w dobie swego rozkwitu kulturalnego, datującego się wiele lat przed narodzeniem Chrystusa, znali magnes i posługiwali się nim. Magnesy posiadają rozmaite kształty: sztabek, podków, igieł itp. Używamy ich do wielu aparatów elektrycznych i przyrządów jak: słuchawka telefoniczna, induktor, kompas itp.

Magnes naturalny. Pierwszym magnesem, którym posługiwali się ludzie, był magnes naturalny (rys. 69). Jest to odmiana rudy żelaznej, która dzięki swej specjalnej budowie posiada własność przyciągania żelaza. Rudę tę wydobywa się z ziemi tak jak inne rudy żelazne lub węgiel. Do dziś dnia istnieją złoża tej rudy w Szwecji, Górach Uralu i Ameryce Północnej. W życiu codziennym nie spotykamy już dziś magnesu naturalnego, a tylko magnes sztuczny, wytwarzany ze stali i posiadający żądane kształty; dzięki temu jest on dużo wygodniejszy w użyciu od magnesu naturalnego, mającego z natury rzeczy postać nieforemnej bryły.

Bieguny magnesu. Próby z magnesem stwierdzają, że posiada on dwa ośrodki zwane biegunami, leżące na obu końcach magnesu, które szczególnie silnie przyciągają żelazo. Między nimi istnieje tzw. strefa obojętna, nie wykazująca działania przyciągającego. Tak więc w magnesie w kształcie sztabki (rys. 70) bieguny te leżą w miejscach *a i b* (część zakreskowana), podczas gdy w magnesie w kształcie podkowy w miejscach *c i d* (rys. 70).

Magnetyzm ziemski. Ziemia dzięki swym złożom rudy magnetycznej posiada również bieguny, które leżą w bliskości biegunów geograficznych; działają one na każdy magnes umocowany swobodnie. Magnes bowiem przyjmuje zawsze takie położenie, że jeden z jego biegunów wskazuje północ. Biegun ten nazwano północnym i oznaczono literą *N*. Drugi biegun magnesu otrzymał nazwę bieguna południowego i oznaczenie literą *S*.

K o m p a s. Własności magnesu wyzyskano w kompasie, gdzie swobodnie umocowana igła magnetyczna (rys. 70) swym biegunem *N* wskazuje zawsze kierunek północny. Zajmiemy się teraz bliżej samym zjawiskiem i istotą przyciągania magnesu.

Przyciąganie się magnesów. Doświadczenie stwierdza, że bieguny dwu magnesów o jednakowych znakach, a więc N z N, S z S odpychają się, podczas gdy bieguny różnoimiennie jak N i S przyciągają się.

Magnesowanie. Dalej okazało się, że kawałek stali staje się magneselem z chwilą potarcia go o magnes, a nawet magnesuje się już w jego bliskim sąsiedztwie. Magnesowanie można sobie najlepiej wyobrazić w sposób następujący: kawałek nienamagnesowanej stali składa się jakby z drobnitkich magnesików ułożonych chaotycznie (rys. 71 a) tak, że działanie ich znosi się i kawałek metalu nie wykazuje na zewnątrz żadnych własności magnetycznych. Z chwilą pociągania po takim kawałku stali jednym z biegunów jakiegoś magnesu, drobne magnesiki układają się w stali jak wskazuje rysunek 71 b. Działanie tych elementarnych magnesików, podobnie jak działanie ogniw elektrycznych łączonych w szereg, dodaje się i kawałek stali wykazuje wówczas na zewnątrz własności magnetyczne. Zjawisko to wykorzystano do wyrobu pierwszych magnesów sztucznych. Dziś magnesujemy stal czy żelazo za pomocą prądu elektrycznego, co zostanie wyjaśnione w dalszych częściach tego rozdziału.

Linie sił. Zachodzi pytanie, w jaki sposób i czym magnesy oddziałują na siebie? W tym celu przeprowadźmy następujące doświadczenie. Na kartce papieru rozsypmy równomiernie opiłki żelaza a następnie od spodu przybliżmy do papieru magnes. Opiłki żelazne ułożą się wówczas w pewne linie zamknięte, wychodzące z biegunów magnesu, jak to wskazuje rys. 72. Linie te zwiemy magnetycznymi liniami sił, a przestrzeń w której się te linie rozchodzą polem magnetycznym magnesu.

Pole magnetyczne. Każdy magnes wytwarza wokół siebie linie magnetyczne tworzące w przestrzeni pole magnetyczne. Za kierunek linii sił przyjęto uważać kierunek od N do S, tzn. że linie wychodzą z bieguna północnego N, a wchodzi do bieguna południowego S. Linie magnetyczne są to jakby ręce magnesu, za pomocą których oddziałuje on na inne magnesy znajdujące się w pobliżu niego. Jeśli weźmiemy dwa magnesy zwrócone do siebie różnoimiennymi biegunami (rys. 73 a), okaże się, że pomiędzy nimi nastąpi zagęszczenie linii sił; za pomocą linii sił szczipają się one niejako między sobą. Im zagęszczenie linii sił jest większe, im więcej linii przebiega pomiędzy biegunami obu magnesów, tym siła przyciągania jest większa. Jeśli dwa magnesy zwrócone są do siebie jednoimiennymi biegunami, to nie ma linii sił łączących magnesy; linie sił będą przebiegać tak, jak wskazuje rys. 73 b, rezultatem czego jest odpychanie się magnesów. Linii sił pola magnetycznego nie możemy bezpośrednio zobaczyć ani wyczuć innymi zmysłami, a tylko obserwujemy ich działanie, tak jak nie widząc wiatru, spostrzegamy jedynie ruch gałęzi, papieru czy pyłu, będący wynikiem jego działania. Kurza daje jakby bezpośredni obraz wiatru, podobnie jak opiłki żelazne w omówionych poprzednio doświadczeniach dają obraz linii sił pola magnetycznego.

Żelazo i stal w polu magnetycznym. Jak wytłumaczyć sobie przyciąganie żelaza i stali przez magnes? Otóż magnes działa tylko na inny magnes znajdujący się w jego bliskości. Powiedzenie, że magnes przyciąga żelazo lub stal jest nieściśle. Jak już wspomniano poprzednio, żelazo lub stal stają się same magnesami z chwilą znalezienia się w polu magnetycznym, czyli magnesują się. Tworzą się na nich bieguny magnetyczne N i S. Na końcu znajdującym się bliżej danego bieguna magnesu tworzy się biegun o znaku przeciwnym. Tak więc na końcu sztabki żelaznej, zbliżonej do północnego bieguna N magnesu, powstaje biegun południowy S. Na zasadzie zaś przyciągania się magnesów, sztabka żelazna, będąca już teraz magnesem, zostanie przyciągnięta. Ponieważ kawałek żelaza znajdujący się w polu magnetycznym zostaje przyciągany do magnesu, to musi on, według podanej poprzednio teorii przyciągania się magnesów, skupiać linie pola. Istotnie, jeśli w polu magnetycznym umieścimy kawałek stali lub żelaza, to jak wskazuje rys. 74, nastąpi w nim zagęszczenie linii sił. Stwierdzić to możemy doświadczalnie.

Ciała ferromagnetyczne. Metale, posiadające łatwość magnesowania się czyli skupiania linii pola magnetycznego, zwiemy ciałami ferromagnetycznymi. Są to przede wszystkim żelazo i stal oraz kobalt i nikiel. Popelniamy tu pewną nieściłość, rozróżniając żelazo i stal, które w rzeczywistości są jednym i tym samym metalem a różnią się jedynie ilością domieszek. Zrobiliśmy to jednak umyślnie, gdyż sposób magnesowania się stali i żelaza jest zupełnie odmienny.

Magnesowanie się żelaza a magnesowanie się stali. Stal, nabrawszy w polu magnetycznym własności magnesu, nie traci ich (magnes trwały), żelazo zaś z chwilą usunięcia go z pola zatracza je prawie zupełnie. Mówimy „prawie“, gdyż w żelazie pozostaje pewien minimalny magnetyzm zwany magnetyzmem szczątkowym, którego działanie poznamy później.

Ciała paramagnetyczne. Metale magnesujące się trudno, a więc prawie nie skupiające linii sił pola magnetycznego, zwiemy ciałami paramagnetycznymi. Do nich należą aluminium, platyna, mangan itd. (rys. 75).

Ciała diamagnetyczne. Istnieją jeszcze metale, które zamiast skupiać linie pola magnetycznego rozpraszają je. Magnesują się więc one odwrotnie niż ciała ferromagnetyczne, a zatem w bliskości bieguna N magnesu powstaje w danym metalu również biegun N (rys. 76). Metale te zwiemy ciałami diamagnetycznymi. Należą do nich: bizmut, cynk, ołów, srebro, złoto, miedź itd. Metale diamagnetyczne magnesują się bardzo trudno.

Magnesowanie się stopów. Jest rzeczą ciekawą, że stopy żelaza z niklem, kobaltem czy innymi metalami mogą okazać większą lub mniejszą zdolność magnesowania się, zależnie od zawartości procentowej poszczególnych metali. I tak żelazo z 25% zawartością niklu jest zupełnie niemagnetyczne, choć oba składniki magnesują się bardzo łatwo.

Naodwrot odpowiednie stopy metali trudno się magnesujących jak miedzi, manganu, aluminium, mają charakter ferromagnetyczny czyli posiadają znaczne właściwości magnetyczne.

Rozmagnesowywanie. Magnesy tracą swoje własności magnetyczne czyli rozmagnesowują się pod wpływem trzech czynników:

1. Rozgrzanie ich do wysokiej temperatury.
2. Wstrząsów mechanicznych (uderzenie młotkiem).
3. Umieszczenie ich w silnym obcym polu magnetycznym tak, by pola magnetyczne przeciwdziałały sobie tzn. by jednoimienne bieguny magnesu rozmagnesowującego i rozmagnesowywanego były skierowane ku sobie.

Pole magnetyczne przewodnika z prądem. Prąd elektryczny, płynąc przez przewód, wywołuje wokół niego pole magnetyczne. O słuszności tego twierdzenia można się przekonać doświadczalnie. Przeprowadźmy przez kawałek papieru przewód elektryczny, a na papierze rozsypmy opiłki żelazne. Jeśli przez przewód przepuścimy prąd elektryczny, to opiłki żelazne ułożą się w linie, będące kołami koncentrycznymi, których środki stanowią przewód elektryczny (rys. 77). Każdy prąd elektryczny wytwarza wokół przewodu, przez który płynie, pole magnetyczne, co pozwala stwierdzić, że nie istnieje prąd elektryczny bez pola magnetycznego. Pole magnetyczne jest tym silniejsze im większy prąd.

Jaki kierunek posiada pole magnetyczne wytwarzane przez prąd elektryczny? Jeśli przyjmiemy kierunek prądu taki, jaki wskazany jest na rys. 78 a, to igła magnetyczna umieszczona w polu ustawi się wzdłuż linii sił, wskazując swym biegunem północnym N kierunek pola magnetycznego. Zależność między kierunkiem prądu a kierunkiem pola magnetycznego określa reguła śruby prawoskrętnej:

Reguła śruby prawoskrętnej. Jeśli kierunek prądu elektrycznego jest zgodny z kierunkiem wkręcania śruby, to kierunek pola magnetycznego będzie kierunkiem obrotu śruby.

Gdy weźmiemy zamiast prostego przewodu kawałek przewodu zwinętego w pętlę i przepuścimy przez niego prąd elektryczny (rys. 78 b), to kierunek pola magnetycznego wyznaczy nam ta sama reguła śruby prawoskrętnej o odmiennym brzmieniu, a mianowicie:

Jeśli prąd elektryczny płynie w kierunku obrotu śruby, to pole magnetyczne posiada kierunek jej wkręcania.

Mechaniczne oddziaływanie na siebie dwóch przewodów z prądem. Dzięki swemu polu magnetycznemu przewód elektryczny z prądem wywiera wpływ zarówno na magnes znajdujący się w jego bliskości (igłę magnetyczną) jak i na inny przewód, przez który płynie prąd elektryczny. Skutkiem tego dwa równoległe umieszczone przewody, przez które płynie prąd elektryczny, przyciągają się, jeśli kie-

runki prądu w obu przewodach są zgodne, natomiast odpychają się, gdy kierunki prądów są przeciwne. Siły mechaniczne występujące między tymi przewodami są tym większe im większe płyną przez nie prądy elektryczne. Gwałtowny wzrost prądu np. skutkiem zwarcia, może spowodować zerwanie przewodów z podtrzymujących je izolatorów, a zatem zniszczenie instalacji. Dlatego też w elektrowniach przewody przez które płyną duże prądy elektryczne, tzw. szyny zbiorcze, budowane są w znacznej odległości od siebie (kilkadziesiąt cm). Zapewnia to nie tylko bezpieczeństwo z punktu widzenia elektrycznego, jak przeskok iskry przy wysokim napięciu, lecz także pozwala uniknąć następstwa nadmiernych sił mechanicznych występujących między przewodami.

Elektromagnes. Zjawisko istnienia pola magnetycznego wokół przewodnika z prądem umożliwiło zbudowanie tzw. elektromagnesu, spotykanego w wielu urządzeniach i aparatach elektrycznych. Pole magnetyczne przewodnika elektrycznego nawiniętego w kształcie cewki cylindrycznej na wzór nitki nawiniętej na szpulkę, posiada przebieg przedstawiony na rys. 79. Widzimy, że na końcach cewki tworzą się dwa bieguny magnetyczne. Jeśli w środku cylindra cewki umieścimy sztabkę żelazną lub stalową, to — ponieważ jak już była o tym mowa metale te skupiają w sobie linie sił pola — otrzymamy na żelazie dwa bieguny magnetyczne N i S, oraz pole magnetyczne, którego przebieg niczym się nie różni od pola magnesów sztucznych czy naturalnych (rys. 80). Sztabka stalowa wprowadzona do środka cewki cylindrycznej zachowuje swe własności magnetyczne nawet po przerwaniu prądu elektrycznego.

Fabrykacja magnesów. W ten sposób fabrykowane są dzisiaj magnesy sztuczne. Przez cewkę nawiniętą na kawałku stali o żądanych kształtach przepuszczamy prąd elektryczny. Ponieważ stal po przerwaniu prądu nie traci nabytych własności magnetycznych, więc kawałek ten pozostaje magnesem.

Magnetyzm szczątkowy. Inaczej zachowuje się żelazo. Sztabka żelazna, na którą nawiniętych jest kilka zwoi przewodnika elektrycznego, posiada własności magnesu tylko dopóty, dopóki przez przewód płynie prąd. Z chwilą przerwania prądu elektrycznego, sztabka żelazna traci prawie zupełnie swe własności magnetyczne, zachowując jedynie tzw. magnetyzm szczątkowy, czyli bardzo słabe zdolności magnetyczne. Stwierdzamy więc, że żelazo posiada słaby zaś stal bardzo silny magnetyzm szczątkowy. Ta właściwość elektromagnesu z rdzeniem żelaznym umożliwiła jego zastosowanie tam, gdzie się żąda, aby magnes działał tylko podczas krótkiej z góry określonej chwili. Tak pracuje elektromagnes w przekaźniku, dzwonku elektrycznym, uchwytach i dźwigach elektromagnetycznych, pomiarowych przyrządach elektromagnetycznych, aparacie telegraficznym Morse'a itd.

Dzwonek elektryczny. Najprostszy układ dzwonka elektrycznego przedstawiony jest na rys. 81. Dzwonek składa się z elektromagnesu (a), baterii (b), klucza (k), młoteczka (m), sprężynki (s) oraz właściwego dzwonka (l). Młoteczek (m) jest zamocowany w punkcie (o)

i przyciągany do dzwonka (l) zapomocą sprężynki (s). Obwód prądu elektrycznego stanowi: bateria (b), klucz (k), styk (c), młoteczek (m), uzwojenie elektromagnesu (a). Z chwilą zamknięcia klucza (k) popłynie w obwodzie tym prąd elektryczny. Żelazo elektromagnesu stanie się magnesem i przyciągnie do siebie młoteczek (m), który odsunie się wówczas od kontaktu (c), powodując przerwę obwodu elektrycznego. Na skutek przerwy prąd elektryczny przestanie płynąć, elektromagnes straci siłę przyciągającą i puści młoteczek (m), który przyciągnięty sprężynką (s) uderzy w dzwonek (l). Dzwonek wyda dźwięk. Jednocześnie młoteczek (m) zetknie się znów z kontaktem (c), zamknie obwód prądu elektrycznego, prąd znów popłynie, elektromagnes zadziała, przyciągnie młoteczek (m) itd. Usłyszymy dzwonięcie, które ustanie dopiero z chwilą rozwarcia klucza (k).

Przełącznik elektryczny. Przełącznik elektryczny służy zazwyczaj do włączania lub wyłączania obwodów elektrycznych na odległość. Układ przełącznika elektrycznego przedstawia rys. 82. Uzwojenie elektromagnesu połączone jest zapomocą przewodów (a, a) z baterią (b) oraz kluczem (k). Nad biegunami elektromagnesu umocowana jest na osi (f) sztabka żelazna (s), zwana kotwiczka elektromagnesu. Jeśli zamkniemy klucz (k), przez uzwojenie elektromagnesu popłynie prąd elektryczny. Elektromagnes zadziała, przyciągnie kotwiczkę (s), która zewrze nam kontakty (c i d). W ten sposób zamknie się nowy obwód elektryczny utworzony z baterii (B), kontaktów (c i d) oraz jakiegoś odbiornika energii elektrycznej (R).

Aparat telegraficzny Morse'a. Układ aparatu Morse'a przedstawiony jest na rys. 83. Z chwilą naciśnięcia klucza (k) zamknie się obwód prądu elektrycznego: klucz (k), bateria (B), płyta (P₁), ziemia, płyta (P₂), uzwojenie elektromagnesu (M) oraz przewód linii napowietrznej (l). W układzie tym wykorzystano ziemię jako drugi przewód elektryczny. Gdy przez uzwojenie elektromagnesu popłynie prąd elektryczny, elektromagnes przyciągnie kotwiczkę (W) a tym samym rysik (r) zostanie przyciśnięty do krążka przesuwającego się papieru (P). Rysik będzie znaczył na papierze kreskę i to tak długo, jak długo przyciskać będziemy klucz (k). Przyciskając celowo dłużej lub krócej klucz (k), otrzymujemy na papierze szereg kresek i kropek tworzących znaki alfabetu Morse'a. Część nadawcza aparatu Morse'a składa się z klucza (k) i baterii (B), część odbiorczą stanowi elektromagnes (M) oraz urządzenie piszące.

Elektromagnetyczne przyrządy pomiarowe. Sposób pomiaru prądów i napięć elektrycznych jest podany w rozdziale XIII. Tutaj zajmiemy się ogólną zasadą budowy przyrządu elektromagnetycznego (rys. 84). Składa on się z cewki cylindrycznej, oraz rdzenia żelaznego zamocowanego na sprężynce. Do rdzenia przytwierdzona jest wskazówka. Prąd elektryczny przepływający przez cewkę wytwarza pole magnetyczne magnesujące rdzeń żelazny, skutkiem czego rdzeń zostaje przyciągany, a właściwie wciągany w cewkę, i przesuwają wskazówkę. Wychylenia wskazówki zależne będą od wielkości przepływającego prądu.

Przepuszczając prądy o znanych natężeniach, możemy oznaczyć na skali ich wielkości czyli wyskalować przyrząd. Budując przyrząd elektromagnetyczny pokazany na rys. 85, zamiast ruchu posuwowego wskazówki można otrzymać jej ruch obrotowy. Mamy tu w środku cewki cylindrycznej dwa rdzenie żelazne. Jeden z nich jest zamocowany, drugi ruchomy razem ze wskazówką. Pole magnetyczne cewki magnesuje oba rdzenie jednoimienne, a więc będą się one od siebie odpychać. Wychylenie wskazówki będzie tym większe im większy prąd elektryczny płynie przez cewkę. Przeskalowawszy przyrząd możemy mierzyć nim natężenie prądu elektrycznego. Jeśli zmienimy kierunek prądu płynącego przez cewkę, to jednocześnie na obu rdzeniach, tak zamocowanym jak i ruchomym, zmieni się biegunowość, to znaczy, tam gdzie były bieguny N będą bieguny S, a tam gdzie były S będą N. Ponieważ bieguny S i S też się odpychają, wskazówka przyrządu będzie wychylać się w tę samą stronę co i poprzednio. Dlatego, niezależnie od kierunku przepływu prądu, wychylenia wskazówki przyrządów elektromagnetycznych zachodzą zawsze w jednym i tym samym kierunku i przyrządy te mogą być stosowane zarówno na prąd stały jak i prąd zmienny.

Strumień magnetyczny (Maxwell). W tych paru przykładach zaznajomiliśmy się ze sposobem pracy elektromagnesu, a teraz przejdziemy do jego obliczenia. Linie sił wychodzące z bieguna północnego przebiegają na zewnątrz elektromagnesu i wchodzi do bieguna południowego. W samym elektromagnesie wracają one z powrotem od bieguna południowego do północnego, tworząc tym samym obwód zamknięty. Wszystkie linie sił wychodzące z bieguna magnesu nazywamy strumieniem magnesu i oznaczamy literą Φ (czytaj fi). Jednostką strumienia magnetycznego jest Maxwell, który reprezentowany jest za pomocą jednej linii sił.

Indukcja magnetyczna (Gauss). Strumień, czyli liczbę linii sił przechodzących przez jeden cm^2 powierzchni prostopadłej do ich kierunku, nazywamy indukcją magnetyczną. Oznaczamy ją literą B. Jednostką indukcji magnetycznej jest Gauss. Indukcja magnetyczna 1 gaussa jest to strumień 1 maxwella czyli 1 linia magnetyczna przechodząca prostopadle przez powierzchnię 1 cm^2 . Jeśli przez powierzchnię S przepływa prostopadły do niej strumień Φ , to indukcja magnetyczna wytworzona na powierzchni S wyrazi się stosunkiem strumienia Φ do powierzchni S:

$$B = \frac{\Phi}{S} \text{ Gauss} = \text{maxwell/cm}^2 \dots \dots (22).$$

Strumień magnetyczny przepływa przez zamknięty obwód magnetyczny analogicznie do prądu elektrycznego przepływającego w obwodzie elektrycznym. Strumień natrafia na swej drodze na oporność magnetyczną, podobnie jak prąd elektryczny na oporność elektryczną. Podobnie jak oporność elektryczna, oporność magnetyczna jest tym większa, im dłuższa jest droga strumienia i tym mniejsza, im większy jest przekrój

przez który on przepływa. Zależy ona również od właściwości magnetycznych ośrodków przez które strumień przepływa.

Współczynnik przenikalności magnetycznej. Właściwość magnetyczna ośrodków charakteryzuje się współczynnikiem przenikalności magnetycznej μ (czytaj mi). Jasnym jest, że inaczej zachowywać się musi względem strumienia ośrodek skupiający linie sił jak żelazo lub stal, a inaczej ośrodek rozpraszający linie sił jak np. miedź lub zachowują się względem pola magnetycznego obojętnie jak np. powietrze. Współczynnik przenikalności magnetycznej μ jest dla powietrza równy jedności ($\mu = 1$).

Ponieważ dla ciał rozpraszających linie sił czyli diamagnetycznych μ jest niewiele mniejsze od jedności, zaś dla ciał słabo skupiających czyli paramagnetycznych niewiele większe od jedności, przeto przy obliczeniach technicznych przyjmujemy dla nich również wartość $\mu = 1$.

Ciała łatwo magnesujące się, a więc silnie skupiające linie pola czyli ferromagnetyczne, jak żelazo i stal, posiadają współczynnik przenikalności magnetycznej znacznie większy od jedności dochodzący nawet do kilku tysięcy. Współczynnik ten nie jest stały, lecz zależy od stopnia namagnesowania żelaza lub stali. Krzywa zależności współczynnika przenikalności magnetycznej (μ) od stopnia namagnesowania żelaza czyli od wielkości strumienia magnetycznego Φ lub indukcji B, przedstawia rys. 86. Niestalność współczynnika przenikalności magnetycznej można opisać w następujący sposób:

Żelazo posiada zdolność skupiania linii pola magnetycznego. Zdolność tę wyraża właśnie współczynnik przenikalności magnetycznej. Jeśli żelazo lub stal znajduje się w słabym polu magnetycznym, posiadają one zdolność do silnego skupiania linii pola. Zdolność ta rośnie w miarę wzrostu pola magnetycznego, co na rys. 86 odpowiada wzrostowi μ od punktu a do d, w miarę wzrostu indukcji B od punktu o do c. Przy pewnym dużym natężeniu pola magnetycznego, czyli indukcji B odpowiadającej punktowi c, żelazo nie jest już zdolne skupić nowych linii sił a odwrotnie zdolność ta zanika. Poczynając od punktu d, który zwieemy stanem nasycenia żelaza, współczynnik przenikalności magnetycznej zaczyna maleć, aż przy pewnej bardzo dużej indukcji staje się on równy jedności, czyli żelazo zaczyna się zachowywać jak ciało magnetycznie obojętne (np. powietrze).

Oporność magnetyczna. Linie pola magnetycznego starają się zawsze przebiegać po drodze najmniejszego oporu. Zjawisko więc skupiania przez żelazo lub stal linii pola mówi nam, że metale te stanowią dla strumienia magnetycznego mniejszą oporność niż powietrze, miedź czy aluminium. Oporność ta jest tyle razy mniejsza, ile razy większy jest współczynnik przenikalności magnetycznej żelaza od współczynnika przenikalności magnetycznej powietrza czyli od jedności. Jak już przedtem wspomniano, oporność magnetyczna zależy jeszcze od długości drogi oraz przekroju, przez który strumień przepływa. Wzór na oporność magnetyczną posiada postać:

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot S} \dots \dots \dots (23)$$

gdzie: R_m — jest opornością magnetyczną

l — długość drogi strumienia mierzona w cm

S — przekrój przez który strumień przepływa, mierzony w cm^2

μ — współczynnik przenikalności magnetycznej

Amperozwoje. Do wytworzenia strumienia magnetycznego potrzebna jest pewna energia. Energii tej dostarcza prąd elektryczny przepływający przez uzwojenie elektromagnesu. Jeśli do uzwojenia elektromagnesu przyłożymy pewne napięcie, to popłynie prąd elektryczny. Prąd ten wytworzy, jak już wiemy strumień magnetyczny. Strumień ten będzie silniejszy, im większy popłynie prąd elektryczny przez dane uzwojenie. Zależy więc od ilości zwoi uzwojenia.

Poczyn natężenia prądu elektrycznego mierzonego w amperach i ilości zwoi elektromagnesu określamy mianem amperozwojów (AZ).

Amperozwoje są miarą wielkości strumienia magnetycznego, jaki dany elektromagnes zdolny jest wywołać w danym obwodzie magnetycznym o oporności R_m .

Siła magnetomotoryczna. Tak jak w obwodzie elektrycznym siła elektromotoryczna jest tym czynnikiem, który powoduje przepływ prądu elektrycznego, tak w obwodzie magnetycznym istnieje również siła zwana siłą magnetomotoryczną (E_m), która wytwarza strumień magnetyczny.

Tę siłę magnetomotoryczną wywołują właśnie amperozwoje. Wyraża się ona wzorem:

$$E_m = 0,4\pi \cdot AZ \dots \dots \dots (24)$$

gdzie E_m — jest siłą magnetomotoryczną

A — natężenie prądu elektrycznego mierzone w amperach

Z — ilość zwoi uzwojenia elektromagnesu

π — stała wynosząca 3,14.

Związek między siłą magnetomotoryczną, strumieniem i opornością magnetyczną wyraża się podobnie jak dla obwodu elektrycznego prawem Ohma, a mianowicie:]

$$E_m = \Phi \cdot R_m \dots \dots \dots (25)$$

$$\text{lub } 0,4\pi \cdot AZ = I \cdot \frac{B}{\mu} \dots \dots \dots (26)$$

Obliczanie amperozwojów. Chcąc obliczyć amperozwoje, potrzebne np. do wytwarzania żadanego strumienia w elektromagnesie przedstawionym na rys. 87, postępujemy w następujący sposób:

Obliczamy amperozwoje potrzebne do przeprowadzenia strumienia na poszczególnych drogach l_1, l_2, l_3 , a następnie dodajemy je aby otrzymać żądane całkowite amperozwoje AZ :

$$AZ = AZ_1 + AZ_2 + AZ_3$$

Krzywa magnesowania. Ponieważ zarówno indukcja B jak i współczynnik przenikalności magnetycznej μ nie są stałe, sporządzono wykres zależności amperozwojów (az) potrzebnych do wytworzenia żądanego strumienia magnetycznego na drodze długości l cm przy danej indukcji B (tak zwana krzywa magnesowania, rys. 88). Na końcu książki podane są krzywe magnesowania dla poszczególnych rodzajów żelaza i stali.

Mając dane wymiary żelaza elektromagnesu oraz wielkość żądanego strumienia magnetycznego, możemy obliczyć indukcję B jako stosunek $\frac{\Phi}{S}$ oraz poszczególne długości drogi strumienia l_1, l_2, l_3 itd. Następnie dla danej indukcji B odczytujemy z krzywej magnesowania amperozwoje (az) dla jednego cm drogi, a pomnożywszy je przez długości poszczególnych odcinków drogi strumienia otrzymamy amperozwoje dla tych odcinków (AZ_1, AZ_2, AZ_3).

Sposób obliczania elektromagnesów zrozumiemy najlepiej na poniższym przykładzie:

Przykład 33.

Mamy elektromagnes w kształcie podkowy o przekroju kołowym przedstawiony na rys. 89. Wymiary jego są: promień przekroju $r = 1$ cm. Długość osi przechodzącej przez środek przekroju (linia kreskowana na rysunku) wynosi $l_1 = 24$ cm. Magnes wykonany jest z żelaza. Zadaniem elektromagnesu jest przyciągnąć z odległości 0,5 cm kawałek żelaza, tzw. kotwicę elektromagnesu z siłą 20 kg. Żelazo to posiada kształt walca o długości 6 cm i przekroju kołowym o promieniu $R = 1$ cm.

Obliczyć ilość zwojów oraz prąd elektryczny, jaki powinien płynąć przez uzwojenie elektromagnesu, aby był on zdolny wykonać żądaną pracę.

Magnes przyciąga kotwicę, tak jakby ktoś napiął wzdłuż linii sił łączących bieguny z kotwicą pęk linek. Powierzchnia części kotwicy przez którą przechodzą linie sił, idące z biegunów elektromagnesu, zwana jest powierzchnią czynną. W tym przykładzie powierzchnia czynna jest równa podwójnemu przekrojowi rdzenia elektromagnesu.

Siła przyciągania elektromagnesu. Siła z jaką elektromagnes przyciąga kotwicę, jest tym większa im więcej linii sił pola przechodzi przez kotwicę, a więc im większa jest indukcja B , jak również im większa jest powierzchnia czynna.

Wzór na siłę przyciągającą elektromagnesu posiada postać:

$$P = k \cdot \left(\frac{B}{5000} \right)^2 \cdot \dots \cdot \dots \quad (27)$$

gdzie: P — siła przyciągania elektromagnesu w kg

B — indukcja magnetyczna w gaussach

k — powierzchnia czynna w cm^2 .

Musimy zastanowić się jeszcze, jak przepływa strumień przez rdzeń i kotwicę elektromagnesu. Płynie on całym przekrojem, tak że droga tej części strumienia, który płynie po zewnętrznej stronie rdzenia i kotwicy elektromagnesu, będzie większa od drogi tej części strumienia, który płynie po ich wewnętrznej stronie.

Średnia droga strumienia. Przyjmujemy do obliczeń pewną średnią drogę strumienia przebiegającą mniej więcej przez środek każdego przekroju elektromagnesu. Droga ta jest oznaczona na rys. 89 linią kreskowaną.

Mając już wszystkie dane, możemy przystąpić do obliczeń. Ponieważ magnes przyciąga dwoma biegunami, więc powierzchnia czynna:

$$k = 2\pi r^2 = 2 \cdot 3,14 \cdot 1^2 = 6,28 \text{ cm}^2$$

Z wzoru (27) znajdujemy potrzebną indukcję:

$$B = \sqrt{5000^2 \cdot \frac{P}{k}} = 5000 \sqrt{\frac{20}{6,28}} = 8862 \text{ gaussów}$$

Poszczególne drogi strumienia wynoszą:

$$l_1 = 24 \text{ cm}; \quad l_2 = 2 \cdot 0,5 = 1 \text{ cm}; \quad l_3 = 6 \text{ cm}$$

Ponieważ przekroje dla wszystkich części drogi strumienia są sobie równe, więc panujące tam indukcje będą też sobie równe.!

$$(B_1 = B_2 = B_3 = B)$$

Strumień magnetyczny na odcinkach drogi l_1 i l_3 płynie w żelazie. Odczytujemy z krzywej magnesowania (tabl. IV krzywa b_1). Dla indukcji $B = 8862$ gaussów, potrzebne amperozwoje (az) do przeprowadzenia strumienia przez 1 cm tej drogi w żelazie wynoszą: $az = 2$.

Dla odcinków l_1 i l_3 otrzymamy:

$$AZ_1 = 2 \cdot 24 = 48; \quad AZ_3 = 2 \cdot 6 = 12$$

Dla odcinka l_2 , gdzie strumień płynie przez powietrze, obliczamy amperozwoje ze wzoru (26):

$$AZ_2 = \frac{B \cdot l_2}{0,4 \cdot \pi \cdot \mu} = \frac{8862 \cdot 1}{0,4 \cdot 3,14 \cdot 1} = 7060$$

Widzimy stąd, że większa część amperozwojów idzie na pokonanie oporności szczeliny powietrznej.

Całkowite amperozwoje (AZ) wynoszą:

$$AZ_1 + AZ_2 + AZ_3 = 48 + 7060 + 12 = 7120$$

Zakładając liczbę zwojów $z = 200$, otrzymamy potrzebne natężenie prądu płynącego przez uzwojenie elektromagnesu jako:

$$I = \frac{AZ}{z} = \frac{7 \cdot 120}{200} = 35,6 \text{ A}$$

lub zakładając np. $z = 800$ otrzymamy prąd:

$$I = \frac{AZ}{z} = \frac{7 \cdot 120}{800} = 8,9 \text{ A}$$

Przykład 34.

Mamy elektromagnes w kształcie podkowy o przekroju kwadratowym $2 \times 2 \text{ cm}$. Długość średnia żelaza elektromagnesu wynosi 35 cm , a odstęp między środkami końców podkowy równa się 7 cm . Uzwojenie elektromagnesu posiada 425 zwojów. Z jaką siłą przyciąga elektromagnes przylegającą kotwicę o długości 9 cm i przekroju kwadratowym $2 \times 2 \text{ cm}$, jeśli przez uzwojenie przepuścimy prąd elektryczny o natężeniu 1 amp. ?

Rdzeń elektromagnesu jak kotwica wykonane są z kutego żelaza. (Indukcję B dla danych amperozwoi (az) odczytać na tabl. IV krzywa b).

Rozwiązanie:

W elektromagnesie działają amperozwoje $AZ = 1 \cdot 425 = 425$.

Przekrój żelaza w samym elektromagnesie jak i kotwicy jest jednakowy i wynosi: $S = 2 \cdot 2 = 4 \text{ cm}^2$.

Strumień przepływający jest stały, a więc przy stałym przekroju mamy wszędzie jednakową indukcję B .

Droga strumienia przez elektromagnes = 35 cm .

Droga strumienia przez kotwicę = 9 cm .

Całkowita droga strumienia wynosi $l = 35 + 9 = 44 \text{ cm}$.

Amperozwoje potrzebne do przeprowadzenia strumienia przez jeden cm drogi wynoszą:

$$az = \frac{AZ}{l} = \frac{425}{44} = 9,68$$

Z krzywej b_1 tabl. IV znajdujemy dla tych amperozwojów indukcję B panującą w elektromagnesie: $B = 13800 \text{ gaussów}$.

Ponieważ elektromagnes przyciąga zapomocą obu swych biegunów, więc powierzchnia czynna k równa się podwójnemu przekrojowi bieguna elektromagnesu.

$$k = 2 \cdot S = 2 \cdot 4 = 8 \text{ cm}^2$$

Według wzoru (27) znajdujemy siłę z jaką elektromagnes przyciąga kotwicę:

$$P = k \cdot \left(\frac{B}{5000} \right)^2 = 8 \cdot \left(\frac{13800}{5000} \right)^2 = 61,3 \text{ kg}$$

Rozproszenie.

W dotychczasowych rozumowaniach jak i w przerobionym przykładzie przyjęliśmy, że strumień magnetyczny przepływający przez rdzeń elektromagnesu, przepływa niezmienny w swej wielkości również przez kotwicę. W rzeczywistości tak nie jest. Część strumienia wychodząca z bieguna północnego elektromagnesu nie wchodzi do kotwicy, lecz wprost przez powietrze wpływa do bieguna południowego.

Ten strumień nazywamy strumieniem rozproszenia. Jest on dla nas nieużyteczny, nie przepływając bowiem przez kotwicę, nie wykonuje pracy. Staramy się więc uczynić go jak najmniejszym, bo stanowi on źródło strat; wytwarzając go, zużywamy pewną część energii, której nie jesteśmy w stanie zamienić na użyteczną pracę elektromagnesu. W przeciwieństwie do niego strumień przepływający przez kotwicę zwiemy strumieniem użytecznym, gdyż wykonuje on żadaną pracę. W rdzeniu elektromagnesu płyną oba strumienie, dając w sumie tzw. strumień całkowity, powstały na skutek przepływu prądu elektrycznego przez uzwojenie elektromagnesu.

Strumień rozproszenia stanowi mniej więcej 10—20% strumienia użytecznego. Występuje on wszędzie tam, gdzie droga strumienia przebiega częściowo przez powietrze, oraz wówczas, gdy żelazo elektromagnesu znajduje się w pobliżu stanu nasycenia (rys. 90).

Gdybyśmy chcieli przeprowadzić dokładne obliczenia elektromagnesu w przerobionym przykładzie 33, musielibyśmy przyjąć, że strumień przepływający przez kotwicę elektromagnesu (rys. 89) jest od 10—20% mniejszy od strumienia płynącego w jego rdzeniu.

Działanie pola magnesu na przewód z prądem. Mamy magnes sztuczny lub elektromagnes. W jego polu magnetycznym pomiędzy biegunami N i S umieścimy przewód z prądem, jak to wskazuje rys. 91 a (kółko z krzyżykiem w środku oznacza, że przewód z prądem jest prostopadły do płaszczyzny rysunku, a prąd posiada taki kierunek jakby płynął od patrzącego i wchodzi w rysunek. Kółko z kropką oznaczać będzie, że przewód z prądem jest prostopadły do płaszczyzny rysunku, a prąd wychodzi z niego w kierunku patrzącego).

Prąd elektryczny wytwarza wokół przewodnika własne pole magnetyczne. Jasnym jest, że oba pola, z których jedno pochodzi od magnesu sztucznego lub elektromagnesu, a drugie od prądu elektrycznego płynącego przez przewód, oddziałują w jakiś sposób na siebie. Linie pola magnetycznego możemy przyrównać do naciągniętych gumek zamocowanych w biegunach N i S. Gdy takie naciągnięte gumki będziemy w środku między ich punktami zamocowania wyginać jakimś prętem w bok, będą się one temu przeciwstawiać, zechcą odepchnąć pręt z powrotem i powrócić do położenia prostoliniowego. Obserwując rys. 91 a widzimy, że z prawej strony przewodu z prądem kierunki linii sił wytwarzanych przez magnes i przez przewód z prądem, są zgodne, a z lewej strony przewodu są przeciwnie skierowane. W rezultacie mamy z prawej strony przewodu zagęszczenie, a z lewej strony rozrzedzenie linii sił oraz

ich wypaczenie z prostolinijnego przebiegu jak to przedstawia rys. 91 b. Jeśli wrócimy do porównania linii sił z gumkami, to widać z tego rysunku, że po prawej stronie przewodu wygięte linie sił zechcą powrócić do położenia prostolinijnego i przesuną zawadzający im a nie zamocowany przewód z prądem w stronę lewą. Widzimy więc, że pod wpływem działadnia pola magnesu na przewód z prądem wystąpi ruch przewodu. Otrzymujemy więc z energii elektrycznej pracę mechaniczną, co jest podstawą działania silników elektrycznych.

Zależność między kierunkiem koła magnetycznego, kierunkiem prądu w przewodzie a kierunkiem ruchu przewodu podaje reguła lewej ręki.

Reguła lewej ręki. Jeśli lewą rękę ułożymy w kierunku przewodu w ten sposób, że prąd elektryczny będzie wpływał u nasady ręki a wypływał przy końcach palców, wewnętrzna zaś część dłoni zwrócona będzie do bieguna północnego (N) magnesu, to odchylony duży palec wskaże nam kierunek ruchu przewodu (rys. 92).

Obrót cewki z prądem w polu magnetycznym. Umieścimy w polu magnesu, zamiast pojedynczego przewodu z prądem, ramkę miedzianą, jak to wskazuje rys. 93 a i b.

Pole magnetyczne będzie oddziaływać na oba ramiona (ab i cd) ramki. Przy przyjętym kierunku pola magnesu i prądu elektrycznego, w ramionach ramki otrzymamy na zasadzie reguły lewej ręki kierunki sił P_1 i P_2 działających na boki ramki. Siły te dają w sumie moment obrotowy M , pod wpływem którego ramka obróci się w kierunku oznaczonym na rysunku (93 b) przez półokrągłą strzałkę. Moment ten będzie tym większy, im silniejsze jest pole magnesu i większy prąd płynący przez przewód. W pionowym położeniu ramki tzn., gdy kąt $\alpha = 0$, obie siły P_1 i P_2 będą działały na wspólnej linii pionowej, skutkiem czego moment obrotowy będzie równy zeru i ramka się nie obróci. W położeniu poziomym ramki, tzn. gdy kąt $\alpha = 90^\circ$, moment obrotowy sił P_1 i P_2 posiada wartość największą. Z tego widzimy, że moment obrotowy ramki zależy nie tylko od wielkości prądu i pola magnesu, ale i od położenia ramki czyli kąta α . Obrót cewki, jako wynik ruchu obrotowego przewodnika z prądem pod wpływem działania pola magnesu, umożliwił budowę silników elektrycznych (patrz rozdz. XI) i magnetoelektrycznych oraz elektrodynamicznych przyrządów pomiarowych.

Magneto elektryczne przyrządy pomiarowe. Umieścimy cewkę w polu magnesu sztucznego (rys. 94). Jeśli przez cewkę przepuścimy prąd elektryczny (i) o kierunku jak wskazuje rys. 94, to powstanie moment obrotowy, obracający cewkę w kierunku zgodnym z obrotem wskazówki zegara (reguła lewej ręki). Do cewki przymocowana jest sprężynka, której zadaniem jest sprowadzenie cewki do położenia zerowego. Przeciwdziała więc ona obrotowi cewki. Cewka zatrzyma się w takim położeniu, dla którego moment obrotowy, powstały od przepływu prądu przez cewkę, zrównoważy się z momentem hamującym, wytwarzanym przez sprężynkę. Wskazówka przymocowana do cewki obra-

cając się wraz z nią wskaże na skali działkę odpowiadającą wielkości prądu płynącego przez przyrząd. Ponieważ na zasadzie reguły lewej ręki kierunek obrotu cewki zależy od kierunku prądu w jej ramionach, przeto w razie przepływu prądu w kierunku odwrotnym niż na rysunku, wskazówka przyrządu wychyli się w lewą stronę od położenia zerowego. Dlatego przyrządy magnetoelektryczne, o ile nie mają wycechowanego zera w środku skali, mają na swych zaciskach oznaczenia (+) i (-), do których trzeba załączyć źródło prądu odpowiednimi biegunami. Nie mogą też być one stosowane na prąd zmienny.

Elektrodynamiczne przyrządy pomiarowe. Zamiast pola magnetycznego, wytwarzanego przez magnes sztuczny, jak to ma miejsce w przyrządach magneto-elektrycznych, w tzw. przyrządach elektrodynamicznych posiadamy pole magnetyczne powstałe od prądu płynącego w nieruchomej cewce cylindrycznej (I) (rys. 95). W środku tej cewki znajduje się druga cewka cylindryczna ruchoma (II). Przyrząd ten działa na tej samej zasadzie co przyrząd magneto-elektryczny z tą różnicą, że nieruchome pole magnetyczne nie jest tu stałe, a zależne od wielkości prądu w cewce (II). Stąd też wychylenie wskazówki będzie zależne od wielkości każdego z prądów płynących przez cewkę tak ruchomą jak i nieruchomą, czyli od ich iloczynu. Jeśli przyrządu tego zechcemy użyć jako amperomierza, to cewkę ruchomą i nieruchomą łączymy w szereg. Przez obie cewki przepływa wtedy ten sam prąd, a wychylenie wskazówki jest proporcjonalne do kwadratu prądu i niezależne od jego kierunku. Dlatego też amperomierze zbudowane na tej zasadzie posiadają, tak jak przyrządy cieplne, skalę kwadratową. Mogą być one stosowane zarówno na prąd stały jak i zmienny.

Przyrządy elektrodynamiczne używane są głównie jako watomierze do pomiaru mocy prądu elektrycznego (patrz rozdz. XII).

ROZDZIAŁ VI

ZMIENNOŚĆ WIELKOŚCI ELEKTRYCZNYCH W CZASIE NAPIĘCIE I PRĄD ZMIENNY

Aby zrozumieć wiele przebiegów i zjawisk zachodzących w elektro-technice, musimy zdać sobie dokładnie sprawę z istoty zmienności niektórych wielkości elektrycznych w czasie.

Wyobraźmy sobie obwód elektryczny złożony ze źródła prądu stałego o napięciu $U = 20 \text{ V}$, wyłącznika K i odbiornika energii elektrycznej o oporności $R_1 = 20 \Omega$ (rys. 96). Gdy pominiemy oporność wewnętrzną źródła i oporności przewodów doprowadzających jako bardzo małe, wówczas z chwilą zamknięcia klucza K popłynie w obwodzie prąd, którego wielkość na zasadzie prawa Ohma będzie:

$$I = \frac{U}{R_1} = \frac{20}{20} = 1 \text{ A.}$$

Załóżmy, że klucz włączamy o godz. 10 a wyłączamy o 12. Spróbujmy narysować wykres przebiegu tego prądu w czasie. W tym celu rysujemy dwie osie: pionową i poziomą (rys. 97). Na osi poziomej będziemy w dowolnej skali odmierzać czas w godzinach. To samo zrobimy dla prądu, odmierzanego w amperach, na osi pionowej. Do godz. 10 klucz K był otwarty, więc prąd w obwodzie do tej godziny nie płynął, był równy zeru. O godz. 10 zamknęliśmy klucz — prąd skoczył z wartości zera od razu do wartości 1 ampera. Płynął on tak do godz. 12. Ponieważ o tej godzinie wyłączyliśmy klucz, wartość prądu spadła znów raptownie do zera. W ten sposób otrzymujemy wykres czasowy prądu w obwodzie. Z wykresu takiego możemy odczytać kiedy powstał prąd w obwodzie, kiedy zaniknął, jego wielkość w każdym momencie, czy maleje, czy też rośnie lub zmienia swą wartość, w jaki sposób i w jakim czasie osiąga on inną wartość, a więc wszystko to, co się działo z prądem w ciągu pewnego okresu czasu, innymi słowy jego zmianę w czasie.

Jak się będą przedstawiały w czasie wykresy napięcia U na źródle i spadku napięcia U_1 na oporności odbiornika R_1 ?

Napięcie U na źródle istnieje zawsze; było i o 8 rano, o 10 i o 15. Będzie więc ono przedstawiało linię prostą równoległą do osi czasu, porównaną od wartości 20 V na skali napięć, która to skala leży na tej samej osi, co skala prądu (rys. 97 linia kreskowana).

Spadek napięcia U_1 na oporności R_1 , gdy klucz jest otwarty, równy jest zeru. Z chwilą zamknięcia klucza o godz. 10, spadek na

pięcia U_1 stanie się równy napięciu źródła U i będzie istniał tak długo, dopóki klucz będzie zamknięty tzn. do godz. 12, poczem, po jego otwarciu, spadnie do zera. Otrzymamy wykres oznaczony na rys. 97. linią kropkowaną.

Zmienne skokami w czasie prądu i spadek napięcia na oporności na skutek przerywania obwodu. Wyobraźmy sobie teraz, że klucz w naszym układzie połączeń (rys. 96) zaczynamy zamykać i otwierać w krótkich odstępach jednorodnych. Wtedy prąd w obwodzie będzie przez jedną minutę płynął, przez drugą nie, i tak naprzemian. Czasowy wykres prądu przedstawi się wówczas tak, jak to podaje rys. 68. Łatwo się przekonać, że wykres spadku napięcia na oporność R_1 będzie taki, jak go przedstawiają prostokąty kropkowane na rys. 98.

Przejdźmy do wykresu bardziej skomplikowanego.

Wyobraźmy sobie, że nasz obwód z rys. 96 przez pierwszą minutę jest otwarty. Po pierwszej minucie włączamy oporność $R_1 = 20 \Omega$, wówczas ze źródła popłynie prąd jednego ampera. W drugiej minucie włączamy równolegle do oporności R_1 drugą taką samą oporność, wtedy ze źródła popłynie prąd dwa razy większy czyli dwa ampery i będzie płynął do chwili, gdy włączymy równolegle trzecią oporność tej samej wartości. W trzeciej minucie popłynie więc prąd trzech amperów. Jeśli od czwartej minuty zaczniemy po kolei w minutowych odstępach wyłączać oporności, wówczas całkowity wykres czasowy prądu płynącego ze źródła przedstawi się tak, jak wskazuje rys. 99. Napięcie na źródle U i spadek napięcia U_1 przedstawiają odpowiednie linie kreskowane i kropkowane rys. 99.

Zmiana ciągła w czasie prądu w obwodzie na skutek jednostajnej zmiany oporności odbiornika. Załączmy na źródło prądu o napięciu $U = 30 \text{ V}$ w szereg ze stałym oporem $R = 5 \Omega$ opór z suwakiem $R_1 = 25 \Omega$ (rys. 100). Jeśli od chwili załączenia ($t = 0$) będziemy równomiernie przesuwać suwak po oporniku R_1 tak, że po czasach 0, 1, 2, 3, 4 i 5 sekundach będzie on przechodził przez punkty opornika R_1 odpowiadające wartościom 25, 20, 15, 10, 5 i 0 Ω , wówczas szeregowe połączenie tych oporów ze stałą opornością $R = 5 \Omega$ da nam w sumie całkowity opór w obwodzie, zmieniający się od wartości 30 przez 25, 20, 15, 10 do 5 Ω . Na zasadzie prawa Ohma, ze źródła o napięciu 30 V spowoduje to w rezultacie w tych chwilach przepływ prądu o wielkościach 1, przez 1,2; 1,5; 2,3 do 6 A.

Jeśli na osiach (rys. 101) wyznaczmy te prądy dla odpowiednich im czasów 0, 1, 2, 3, 4 i 5 sek., otrzymamy punkty jak na rys. 101. Zmiana oporności odbywa się w czasie w sposób ciągły (nie skokami), więc i zmiana prądu w czasie jest ciągła; przedstawia to linia łącząca punkty uprzednio wyznaczone. Jeślibyśmy stale, równomiernie przesuwali suwak po oporniku R_1 tam i z powrotem, otrzymalibyśmy wykres prądu w czasie, podany na rys. 102.

Zmiana ciągła w czasie prądu w obwodzie i spadku napięcia na odbiorniku na skutek zmiany w sposób ciągły wielkości napięcia zasilającego. Dotychczas rozpatrywaliśmy wypadki, w których źródło posiadało stałe napięcie, zaś zmiana natężenia prądu w obwodzie następowała na skutek przerywania obwodu lub zmiany oporności w obwodzie. Teraz rozpatrzmy wypadek spotykany w elektrotechnice najczęściej, a mianowicie gdy odbiornik posiada oporność niezmienną, natomiast zasilające napięcie zmienia się w czasie równomiernie.

Załączmy na źródło o napięciu $U = 100$ V stosunkowo niewielki opornik $R = 10 \Omega$ (rys. 103). Na oporniku tym wystąpi spadek napięcia równy napięciu źródła $U = 100$ V, rozłożony równomiernie wzdłuż całego opornika $R = 10 \Omega$. Na każdy jeden om oporności oporu R wypadnie zatem 10 V spadku napięcia. Przesuwając na oporniku R suwak K , będziemy mogli zasilac odbiornik o stosunkowo dużej oporności $R_1 = 100 \Omega$ najrozmaitszymi napięciami od 0 do 100 V, zależnie od położenia suwaka K na oporniku R . Przesuwajmy kontakt K wzdłuż całego opornika R tam i z powrotem równomiernie, raz w ciągu sek. Prąd I_1 , płynący wówczas przez odbiornik R_1 , zależy od położenia kontaktu K i na zasadzie prawa Ohma możemy obliczyć go jako iloraz odpowiedniej części spadku napięcia na oporniku R przez oporność $R_1 = 100 \Omega$. W ten sposób przebieg prądu I_1 wyznaczony w czasie będzie miał charakter podany na rys. 104. Prąd I_1 będzie się zmieniał w sposób ciągły, od wartości 1 A do 0 i z powrotem do 1 A itd.

Napięcie U_1 na odbiorniku R_1 , odpowiadające właściwej części spadku napięcia na oporze R , zależnej od położenia kontaktu K , będzie się zmieniało tak, jak to wskazuje krzywa kreskowana na rys. 104 od 100 V do 0 i z powrotem od 0 do 100 V itd. W ten sposób otrzymujemy na odbiorniku R_1 ciągłą w czasie zmianę prądu I_1 i napięcia U_1 .

Prąd i napięcie zmienne. Wyobraźmy sobie, że zamiast układu połączeń rys. 103, użyliśmy do zasilania naszego odbiornika dwóch źródeł, każde o napięciu $U I = U II = 100$ V, i dwóch oporów R , każdy po 10Ω , połączonych tak, jak to przedstawia rys. 105. Przesuwajmy kontakt K od punktu A przez O do punktu B i obserwujmy co będzie się dziać z prądem. Gdy kontakt K znajduje się w punkcie A , ze źródła I płynie przez odbiornik R_1 prąd I_1 równy 1 A w kierunku oznaczonym strzałką ciągłą. W miarę przesuwania kontaktu K w stronę punktu O , prąd I_1 stopniowo maleje, a gdy kontakt znajdzie się w punkcie O , prąd I_1 będzie równy zeru. Nie zatrzymujemy się jednak tutaj z kontaktem i przesuwajmy go dalej do punktu B . Odbiornik R_1 zacznie być teraz zasilany ze źródła II . Rozpatrując położenie dodatniego i ujemnego bieguna źródła II , stwierdzimy, że prąd w odbiorniku R_1 z chwilą przejścia kontaktu przez pkt. O w stronę pkt. B zmienił kierunek, płynie on teraz w stronę przeciwną niż uprzednio, mianowicie tak, jak to wskazuje strzałka kreskowana. Wartość prądu w miarę zbliżania się kontaktu do punktu B będzie rosła, aż osiągnie 1 A. Jeśli kierunek prądu w oporze R_1 przy położeniu kontaktu pomiędzy A i O uznamy za dodatni, to

jego kierunek odwrotny, przy położeniu kontaktu między punktem O i B, będzie ujemny. W ten sposób, przechodząc kontaktem od położenia A przez O do B, prąd w odbiorniku R_1 będzie się zmieniał od wartości plus 1 A przez O do minus 1 A.

Rozpatrując układ połączeń na rys. 105, łatwo przekonać się, że w tym czasie napięcie na odbiorniku R_1 (pamiętajmy o znakach biegunów źródeł I i II) będzie się zmieniać od +100 V przez 0 do -100 V. Jeslibyśmy kontakt K poruszali od pkt. A przez O do pkt. B i z powrotem przez O do A, czyli wzdłuż obu oporów R tam i z powrotem, w ciągu np. jednej sekundy, otrzymalibyśmy na odbiorniku R_1 wykres prądu I_1 i napięcia UI o takim charakterze, jak go przedstawia rys. 106. Ogólnie biorąc prąd i napięcie, które w czasie zmieniają swą wielkość i kierunek, nazywamy prądem i napięciem zmiennym. Jakkolwiek źródła I i II posiadają napięcie stałe, odbiornik R_1 zostaje zasilany napięciem zmiennym na skutek ruchu kontaktu K po obu oporach R. Dlatego też prąd I_1 , płynący przez odbiornik, jest prądem zmiennym.

Pole magnetyczne zmienne. Wiemy, że prąd elektryczny, przepływając przez cewkę, wywołuje wokół niej pole magnetyczne. Pole magnetyczne jest silniejsze lub słabsze, zależnie od wielkości prądu płynącego przez cewkę. Siła pola magnetycznego a więc np. siła przyciągania elektromagnesu została przez nas przedstawiona ilością, a raczej gęstością linii sił. Im prąd w cewce większy, tem wychodzi z niej więcej linii sił, tem jej działanie magnetyczne jest silniejsze. Wyobraźmy sobie, że na oporniku z suwakiem R załączyliśmy z jednej strony źródło prądu stałego o napięciu U, z drugiej zaś strony cewkę (rys. 107). Układ ten pozwoli nam, w miarę przesuwania suwaka K po oporniku R, zasilac cewkę dowolnymi napięciami mniejszymi od napięcia źródła U, a tym samym w dowolny sposób regulować wielkość prądu płynącego przez cewkę. Jeśli suwak będzie stał tak, jak to pokazuje rys. 107, prąd płynący przez cewkę będzie największy, a tym samym ilość linii sił i działanie magnetyczne cewki najsilniejsze. Gdy suwak K przesuniemy np. do środka oporu R, napięcie zasilające zmniejszy się, z nim zmniejszy się prąd w cewce, a zatem i ilość linii sił (rys. 108). Jeśli wyobrażymy sobie, że w pole magnetyczne naszej cewki wprowadzimy papierek o powierzchni jednego cm^2 , to w wypadku podanym na rys. 107 przeszłoby przez niego o wiele więcej linii sił, niż w wypadku podanym na rys. 108. Gdybyśmy suwak K przesunęli aż do pkt. B, prąd w cewce przestałby płynąć zupełnie i z cewki nie wyszłaby ani jedna linia sił.

Wyobraźmy teraz sobie, że suwak K przesuwamy ruchem ciągłym po oporniku R od pkt. A do B tam i z powrotem. Co się dzieje wówczas z polem magnetycznym cewki i z gęstością jego linii sił?

Łatwo możemy sobie przedstawić, że w miarę zanikania prądu do zera i późniejszego jego narastania, pole magnetyczne cewki będzie również stopniowo maleć aż do zera, potem znów narastać itd. Ilość linii sił, przechodząca przez naszą kartkę papieru, początkowo bardzo duża będzie stopniowo malała. W miarę zbliżania się suwaka do punktu B przechodzić będzie przez kartkę coraz to mniej linii sił, w końcu nie

przejdzie żadna. Przy powrotnym ruchu suwaka linie sił zaczną się pojawiać coraz więcej i więcej. Otrzymamy w ten sposób zmienne w czasie pole magnetyczne, co wyrazi się tym, że przez daną powierzchnię będzie przechodzić coraz to inna liczba linii sił.

Jeśli byśmy do zasilania naszej cewki użyli układu dwu źródeł prądu z oporami z rys. 105, otrzymalibyśmy wówczas nie tylko zmianę ilości linii sił w czasie, ale przy przejściach suwaka K przez O, tzn. przy zmianie kierunku prądu, jeszcze i odwrócenie kierunku przebiegu linii sił (reguła śruby prawoskrętnej). Na każdym końcu cewki tworzyłyby się na zmianę raz biegun N raz S, a zatem skutkiem zmiennego prądu płynącego przez cewkę otrzymujemy pole magnetyczne zmienne w czasie tak co do wielkości jak i co do kierunku.

ROZDZIAŁ VII

I N D U K C J A

Elektrownia. Wchodzimy do środka budynku. Szereg maszyn elektrycznych tzw. prądnic, napędzanych przez silniki spalinowe, maszyny parowe lub turbiny, wiruje ze stałą szybkością. Od zacisków każdej z prądnic wyprowadzone są przewody przesyłające energię elektryczną. Załączony na te przewody woltomierz wychyli się, wskazując między nimi napięcie. Przyłączona do przewodów żarówka elektryczna zapali się, a załączony silnik elektryczny będzie się kręcił, wykonując żadaną pracę. Amperomierz włączony w szereg z silnikiem względnie z żarówką, wykaże przepływ prądu. Otrzymujemy energię elektryczną, dzięki której pali się żarówka i silnik obraca się. Źródłem energii elektrycznej jest prądnica, która do swego wirowania musi czerpać energię mechaniczną od obracającego ją silnika spalinowego, maszyny parowej lub turbiny. Prądnica przetwarza więc energię mechaniczną na elektryczną. Następujące doświadczenie wyjaśni nam, w jaki sposób odbywa się ta przemiana i na jakiej zasadzie zbudowana jest prądnica.

SEM indukowana przy ruchu przewodu w polu magnetycznym. Na dwóch nitkach mamy zawieszony kawałek pręta miedzianego (rys. 109), jeśli go popchniemy, będzie się wahał przez czas dłuższy tam i z powrotem. Zawieśmy teraz ten pręt w polu magnesu między jego biegunami, a zauważymy, że pchnięty będzie się wahał tak jak poprzednio. Cóż jednak stanie się, gdy do końców pręta przyłączymy żaróweczkę (rys. 110)? Spróbujmy teraz pchnąć pręt. Okaże się, że żaróweczka zabłyśnie a pręt natychmiast przestanie się wahać. Chcąc zachować wahanie pręta, musimy go teraz stale popychać. Stwierdzimy przy tym zapalenie się żaróweczki. Skoro żarówka się pali, płynie prąd. Widzimy, że z wykonanej przez nas pracy otrzymujemy energię elektryczną. Musi więc w obwodzie złożonym z pręta i żaróweczki istnieć źródło energii elektrycznej dające napięcie. Istotnie, jeśli do końców pręta miedzianego przyłączymy woltomierz, to w takt wahań pręta będzie się on wychylał w prawo i lewo (rys. 111), co oznacza, że w pręcie tym wytwarza się siła elektromotoryczna (SEM). Ruch pręta w polu magnetycznym wywołuje powstawanie energii elektrycznej.

Mówimy, że w pręcie powstaje SEM-indukcji dzięki zjawisku, które zwiemy indukcją.

Obróćmy teraz magnes tak, aby ruch przewodu odbywał się wzdłuż linii pola magnetycznego (rys. 112). Zauważymy, że nie ma ani hamującego działania pola magnetycznego na wahający się pręt, ani też wychylenia woltomierza.

Powstawanie więc SEM indukowanej zależy od kierunku ruchu pręta względem pola magnetycznego. W pierwszym wypadku przewód przecina linie pola magnetycznego, podczas gdy w drugim wypadku przewód posuwa się wzdłuż tych linii.

Stąd wniosek:

Indukowana SEM powstaje w przewodzie, jeżeli przewód poruszany przecina linie pola magnetycznego.

Powstała SEM-indukcji ma wielkość:

$$E = B \cdot l \cdot v \cdot 10^{-8} \text{ wolt} \dots \dots (28)$$

gdzie: B — indukcja w gaussach (ilość linii sił/cm²)

l — długość przewodu w cm

v — szybkość ruchu przewodu w cm/sek.

Reguła prawej ręki. Kierunek powstałej SEM-indukcji w zależności od kierunku pola magnetycznego i kierunku ruchu daje nam reguła prawej ręki:

Jeśli prawą dłoń zwrócimy wewnętrzną stroną w kierunku północnego bieguna magnesu a odchylony duży palec wskazywać nam będzie kierunek ruchu, to SEM-indukcji posiada kierunek wskazywany przez palce dłoni (rys. 113).

Uwaga: Kierunkiem SEM jest kierunek prądu płynącego wewnątrz źródła tzn. od bieguna ujemnego do dodatniego, według więc reguły prawej ręki palce dłoni wskazują biegun dodatni źródła SEM indukowanej (patrz rys. 113).

Zasada prądnicy elektrycznej. Zjawisko indukcji zostało wykorzystane do budowy prądnic elektrycznych. Rys. 114 przedstawia ramkę miedzianą, obracającą się w polu magnetycznym. Na końcach tej ramki powstaje podczas wirowania napięcie, będące sumą sił elektromotorycznych indukowanych w każdym z boków ramki. W prądnicach mamy wiele takich ramek równomiernie rozmieszczonych i odpowiednio ze sobą połączonych. Napięcie istniejące na zaciskach maszyny równa się sumie SEM indukowanych w poszczególnych ramkach (rys. 115).

Zamiast poruszać przewód w polu magnetycznym, możemy go zamocować, a poruszać magnesem tak, aby linie sił pola magnetycznego przecinały przewód. Jest zupełnie obojętne, czy przewód przecina linie pola, czy linie pola przecinają przewód, w obu wypadkach indukuje się SEM.

SEM indukowana w zwoju obejmującym zmienny strumień magnetyczny. Poniższe doświadczenie przekona nas o tym, że SEM-indukcji powstaje nie tylko pod wpływem ruchu przewodu w polu magnetycznym. Nawińmy na rdzeń żelazny dwie cewki I i II po kilka zwojów (rys. 116). Na cewkę I załączamy źródło prądu stałego i klucz K, a na cewkę II znany nam już przyrząd magnetoelektryczny (M), z zerem pośrodku skali. Zamknijmy klucz K. Zauważymy, że

w chwili włączenia klucza K wskazówka przyrządu wychyli się i powróci natychmiast do położenia zerowego, w chwili zaś otwarcia klucza K zobaczymy, że wskazówka przyrządu wychyli się również, lecz w stronę przeciwną, poczem powróci znów do położenia zerowego.

Z doświadczenia tego możemy wyciągnąć następujące wnioski:

Gdy klucz K jest zamknięty, przez cewkę I płynie prąd elektryczny, wywołując pole magnetyczne. Linie sił tego pola przechodzą rdzeniem żelaznym przez środek cewki II i wracają przez powietrze z powrotem do rdzenia (rys. 116). Z doświadczenia naszego wynika jednakże, że powstawanie napięcia w cewce II jest wywołane powstawaniem linii sił, gdyż jak to wskazuje ruch wskazówki przyrządu — siła elektromotoryczna indukuje się w niej jedynie w chwilach otwierania i zamykania klucza K.

Dochodzimy do wniosku, że SEM w cewce II zostaje wzniecona tylko powstawaniem i zanikaniem pola magnetycznego.

Powstawanie i zanikanie pola magnetycznego jest niczym innym, jak zmianą ilości linii magnetycznych w czasie. Jak już wiemy z rozdz. VI, taką zmianę ilości linii sił, przechodzących przez daną powierzchnię, daje nam każdy zmienny strumień magnetyczny, wywołany przepływem zmiennego prądu elektrycznego przez cewkę.

Ogólnie więc powiemy:

W zwojach cewki, obejmujących zmienny strumień magnetyczny, powstaje siła elektromotoryczna indukcji.

Jest to jedno z fundamentalnych zjawisk elektrotechniki, na jego zasadzie pracują między innymi transformatory. Obie cewki nie muszą być nawinięte na żelazie, czyli mogą być cewkami powietrznymi.

Obwody sprzężone. W tym wypadku napięcie indukowane w cewce II będzie mniejsze, ponieważ większy będzie strumień rozproszenia, a zatem tylko mała część strumienia magnetycznego, wytwarzanego przez prąd płynący w cewce I, przenika przez uzwojenie cewki II. Układ dwóch cewek, oddziaływujących na siebie, nazywamy obwodami sprzężonymi.

Kierunek prądu powstałego w cewce II na skutek zaindukowanej siły elektromotorycznej jest taki, że wywołane przez ten prąd własne pole magnetyczne wokół przewodu cewki przeciwstawia się narastaniu lub zanikaniu pola magnetycznego cewki I, które ten prąd wywołuje.

Współczynnik indukcyjności własnej. Mamy cewkę cylindryczną załączoną w szereg z żarówką na źródło prądu stałego. Oporność omową cewki nawiniętej grubym miedzianym drutem, jako bardzo małą, możemy pominąć. W obwodzie istnieje więc tylko opór żarówki (R). Jeśli napięcie źródła wynosi U, to prąd płynący przez

obwód według prawa Ohma równa się: $I = \frac{U}{R}$

Kluczem (K_2) zwieramy cewkę. Gdy zamkniemy klucz (K_1), żarówka będzie się jasno świecić (rys. 117a). Zamykamy teraz i otwieramy klucz (K_1), powodując równomierne przerywanie prądu I w obwodzie. Żarówka będzie wówczas migać, lecz świecić równie jasno. Jeśli, przerywając nadal równomiernie prąd w obwodzie, otworzymy klucz K_2 , to zauważymy, że żarówka będzie się palić dużo ciemniej (rys. 117b). Oporność omowa cewki jest znikomo mała, więc otwarcie klucza K_2 nie powinno wpłynąć na światło żarówki. Stwierdzamy jednak, że jest inaczej, a więc musi powstawać w cewce jakaś inna oporność, powodująca zmniejszanie się prądu (I) a tym samym siły światła żarówki. Jeśli przy otwartym kluczu K_2 zamkniemy na stałe klucz K_1 , to żarówka przestanie migać i będzie się palić jednakowo jasno jak przedtem, gdy klucz K_2 był zamknięty. Widzimy z tego, że występuje jakaś dodatkowa oporność cewki tylko wtedy, gdy mamy prąd o zmiennym natężeniu. Tak jest istotnie. Zamykając i otwierając klucz K_1 , powodujemy równomierne przerywanie prądu, a więc zmianę jego w czasie. Prąd ten wytwarza ze swej strony wokół przewodu po którym płynie zmienne pole magnetyczne. Na podstawie zjawiska indukcji wiadomym nam jest, że zmienne pole magnetyczne indukuje siłę elektromotoryczną w każdym zwoju, który obejmuje linie sił.

SEM - samoindukcji. Tak więc i w naszej cewce z powodu zmian pola, wywoływanych przerywaniem prądu w obwodzie, zaindukuje się napięcie zwane SEM - samoindukcji. Jest to zjawisko wtórne, gdyż przerywany prąd, płynący w cewce, wywołuje zmienne pole magnetyczne, ono zaś ze swej strony wytwarza w tejże samej cewce SEM - samoindukcji. Stąd pochodzi nazwa samoindukcji, gdyż prąd oddziałuje sam na siebie.

Prąd samoindukcji. Powstała w ten sposób w cewce SEM - samoindukcji jak każde inne napięcie wywołuje w obwodzie przepływ nowego prądu zwanego prądem samoindukcji. Prąd ten dodaje się w obwodzie do prądu płynącego ze źródła, dając w rezultacie prąd sumaryczny wskazany na rys. 117b (porównaj wykres prądu przy zwartej cewce rys. 117a).

SEM - samoindukcji posiada taki kierunek, że prąd powstały dzięki niej w obwodzie przeciwdziała zmianom prądu wytwarzanego przez źródło. Jeśli w obwodzie prąd maleje, to prąd samoindukcji, mając kierunek zgodny z prądem płynącym w obwodzie, będzie opóźniał tym samym jego zmniejszanie się. Jeśli prąd w obwodzie rośnie, to prąd samoindukcji posiada kierunek przeciwny, co utrudnia wzrost prądu w obwodzie. Tak więc z chwilą zmian natężenia prądu, źródło ma do pokonania nie tylko spadek napięcia na oporności omowej żarówki, lecz i SEM - samoindukcji powstającą w cewce.

Oporność indukcyjna. Analogicznie do spadku napięcia na oporności omowej żarówki, możemy uważać SEM - samoindukcji za spadek napięcia na tzw. oporności indukcyjnej cewki oznaczonej lit. X_L .

W czasie więc przerywania obwodu rys. 117b oprócz oporności omowej żarówki R istnieje jeszcze oporność indukcyjna X_L cewki,

która powoduje, że prąd w obwodzie maleje i żarówka pali się ciemno. Oporność indukcyjna jest tym większa, im częstsze są zmiany prądu a poza tym zależy od budowy cewki, czyli od jej wymiarów, ilości zwojów i sposobu ich nawinięcia oraz własności magnetycznych materiału rdzenia.

Indukcyjność cewki. Wpływ tych czynników na wielkość oporności indukcyjnej określamy współczynnikiem indukcyjności własnej cewki i oznaczamy go literą L. Jednostką indukcyjności jest Henr. W cewce o indukcyjności jednego henra indukuje się SEM-samoindukcji o napięciu jednego wolta przy zmianie prądu w czasie jednej sekundy o jeden amper.

Jednostkami mniejszymi od henra są:

$$\text{milihenr (mH) } 1 \text{ mH} = \frac{1}{1000} \text{ H}$$

$$\text{mikrohenr } (\mu\text{H}) 1 \mu\text{H} = \frac{1}{1000} \text{ mH} = \frac{1}{1000000} \text{ H}$$

Dla cewki cylindrycznej bez rdzenia, tzn. powietrznej, indukcyjność L wynosi:

$$L = \frac{4\pi \cdot z^2 \cdot F}{1 \cdot 10^3} \dots \dots \dots (29 \text{ a})$$

gdzie: L = indukcyjność cewki w mikrohenrach (μH)

z = ilość zwojów cewki

F = powierzchnia przekroju cewki w cm^2

l = długość nawinięcia cewki cm

Dla tej samej cewki lecz nawiniętej na rdzeniu żelaznym będzie:

$$L = \frac{4\pi \cdot z^2 \cdot F \cdot \mu}{1 \cdot 10^3} \dots \dots \dots (29 \text{ b})$$

Indukcyjność wzrosła μ razy, dzięki wpływowi współczynnika przenikalności magnetycznej μ rdzenia.

Indukcyjność przewodu. Prosty przewód elektryczny posiada również indukcyjność własną, choć dużo mniejszą od indukcyjności cewki.

Musimy pamiętać, że choć cewka posiada zawsze indukcyjność własną, występuje ona w postaci oporu indukcyjnego tylko z chwilą zmiany natężenia prądu elektrycznego, płynącego przez cewkę, a więc w momencie załączania i wyłączania źródła prądu stałego, oraz w wypadku zasilania cewki prądem zmiennym (zob. rozdz. VIII).

Przykład 35.

Jaka jest indukcyjność cewki powietrznej cylindrycznej jednowarstwowej o średnicy $d = 5$ cm i ilości zwojów $z = 200$ nawiniętej izolowanym drutem o średnicy $d_1 = 0,5$ mm?

Długość nawinięcia cewki l znajdziemy jako iloczyn ilości zwojów z przez średnicę drutu $d_1 = 0,5$ mm:

$$l = z \cdot d_1 = 200 \cdot 0,5 = 100 \text{ mm} = 10 \text{ cm.}$$

Przekrój cewki F :

$$F = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 5^2}{4} = 19,6 \text{ cm}^2$$

Indukcyjność L cewki na podstawie wzoru 29 a będzie:

$$L = \frac{4\pi \cdot z^2 \cdot F}{l \cdot 10^3} = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 200^2 \cdot 19,6}{10 \cdot 10^3} = 980 \mu\text{H}$$

ROZDZIAŁ VIII

PRĄD ZMIENNY

Zanim przejdziemy do zaznajomienia się z prądem zmiennym, określimy na podstawie poznanych dotychczas właściwości, co to jest napięcie i prąd stały.

Napięcie i prąd stały. Napięciem stałym nazywamy napięcie, które nie zmienia w czasie ani swego kierunku (biegunowości), ani wielkości. Napięcie stałe powoduje w obwodzie elektrycznym przepływ prądu stałego.

Prąd stały jest to taki prąd, który płynie w obwodzie zawsze w jednym i tym samym kierunku, od bieguna dodatniego poprzez załączony obwód do ujemnego bieguna źródła. Źródło prądu stałego nie ma wpływu na zmianę natężenia prądu w czasie, dostarcza ono prądu stałego o wielkości zależnej tylko od oporności obwodu. Jeśli oporność obwodu nie zmienia swej wielkości w czasie, tzn. nowe opory w czasie pracy źródła nie są załączone do obwodu lub odeń odłączone, wówczas prąd stały posiada zawsze tę samą wartość natężenia. W chwili dołączenia lub odłączenia nowego oporu, wartość natężenia prądu stałego raptownie się zmienia, ale pozostaje nadal stałą, dopóki nie zajdą nowe zmiany. Cechą charakterystyczną prądu stałego jest to, że nie płynie on przez kondensator, a cewka nie przedstawia dla niego oporności indukcyjnej.

Napięcie i prąd zmienny. Napięciem i prądem zmiennym nazywamy takie napięcie i prąd, które w czasie zmieniają swą wartość i kierunek. W praktyce interesować nas będą prawie zawsze zmiany regularne napięcia i prądu, to też w tym rozdziale tylko o takich będzie mowa.

Szybkość kątowna. Rozpatrując przebiegi prądu zmiennego, będziemy często spotykać pojęcie szybkości kątownej oznaczonej literą ω (czytaj: omega). Szybkość jest to droga przebyta w ciągu jednostki czasu. Mierzac np. drogę w kilometrach a czas w godzinach, otrzymamy szybkość w km/godz. Jeśli przedmiot nie porusza się po linii prostej a obraca się wokół pewnego punktu, zatacza on wówczas koła. Wygodnie jest wtedy określać jego szybkość, nie jako drogę przebytą w ciągu jednostki czasu po kręgu koła, ale jako kąt, który przedmiot ten zatoczył w ciągu jednostki czasu.

W ten sposób określana szybkość nosi nazwę szybkości kątownej. Sekundnikowa wskazówka zegarka wykonuje pełny obrót w ciągu jednej minuty. Ponieważ jak wiemy pełny obrót jest to obrót o kąt 360° , więc

wskazówka obracając się jeden raz na minutę porusza się z szybkością kątową ω równą $360^\circ/\text{min}$ lub $360/60 = 6^\circ$ na sekundę. Oznacza to, że wskazówka w ciągu jednej sekundy obróci się o kąt 6° . Chcąc znaleźć kąt, jaki wskazówka sekundnikowa zrobi np. w ciągu czasu $t = 15$ sek., musimy jej szybkość kątową ω pomnożyć przez ten czas (t)

$$\omega \cdot t = 6 \cdot 15 = 90^\circ$$

a więc nasza wskazówka po 15 sekundach obróci się o kąt 90° . Jeśli czas poruszania się wskazówki będziemy liczyć od jej położenia pionowego, to po 15, 30, 45 i 60 sekundach przyjmie ona położenia i zatoczy kąty podane na rys. 118.

W powyższym przykładzie rozpatrywaliśmy szybkość kątową wskazówki zegarka; otóż podobnie możemy mówić o szybkości kątowej wału silnika, prętów uzwojenia prądnicy itd.

Ogólnie szybkość kątowa jest to wielkość kąta zataczanego w ciągu jednej sekundy.

Powstawanie napięcia zmiennego. Wiemy już, że w przewodzie elektrycznym, poruszającym się w polu magnetycznym, powstaje na zasadzie zjawiska indukcji SEM-indukcji. Umieścimy w polu magnetycznym ramkę miedzianą i wprowadzimy ją w ruch obrotowy (rys. 119). Przewód ramki, obracając się wokół osi (O), przecina linie pola magnetycznego. SEM indukowana jest tym większa, im większa jest ilość przecinanych linii sił na sekundę. Niech ramka miedziana obraca się ze stałą szybkością kątową ω , tzn. że w jednej sekundzie przekreśla się ona o kąt ω . W ciągu czasu t nastąpi więc obrót ramki równy kątowi ωt . Rozpatrzmy obecnie obrót pełny ramki czyli o kąt 360° , przyjmując położenie pionowe ramki jako wyjściowe, dla którego kąt $\omega t = 0$ (rys. 120).

W chwilach, gdy ramka przyjmuje położenie pionowe, boki ramki, posuwając się równoległe do kierunku linii sił pola magnetycznego, wcale ich nie przecinają. SEM-indukcji jest wówczas równa zero. Przy obrocie ramki w kierunku wskazanym na rys. 120, bok ramki zacznie przecinać linie pola i to tym częściej im bardziej ramka zbliża się do położenia poziomego, a kąt obrotu ωt do wartości 90° . SEM indukowana rośnie więc stopniowo, osiągając swą największą wartość dla $\omega t = 90^\circ$ (położenie ramki poziome). Następnie przy dalszym obrocie, aż do wartości $\omega t = 180^\circ$ ilość linii sił przecinanych przez przewód maleje i dla drugiego położenia pionowego, czyli $\omega t = 180^\circ$, staje się równa zero. SEM indukowana maleje więc teraz, osiągając wartość zero dla kąta $\omega t = 180^\circ$.

Podczas tego pierwszego półobrotu przewód ramki posuwał się z góry w dół. Natomiast przy dalszym obrocie ramki przewód posuwał się będzie z dołu do góry. W stosunku do pola magnetycznego zmienił się więc kierunek jego ruchu, a zatem na zasadzie reguły prawej ręki musi odwrócić się kierunek siły elektromotorycznej w nim indukowanej. Jeśli podczas pierwszego półobrotu przyjmujemy kierunek SEM indu-

kowanej w przewodzie za dodatni, to podczas drugiego półobrotu musimy go uważać za ujemny. Przy obrocie od wartości kąta $\omega t = 180^\circ$ do $\omega t = 270^\circ$, ilość przecinanych linii sił przez przewód rośnie, osiągając największą wartość dla $\omega t = 270^\circ$. SEM-indukcji rośnie więc znów stopniowo, osiągając maksymalną wartość ujemną dla $\omega t = 270^\circ$ (położenie ramki poziome). Dalej dla ωt od 270 do 360° ilość przecinanych linii sił maleje aż do wartości zero dla $\omega t = 360^\circ$. SEM indukowana maleje, osiągając wartość zero dla $\omega t = 360^\circ$.

Powróciliśmy do położenia początkowego. Przy dalszych obrotach ramki przebiegi siły elektromotorycznej indukowanej powtarzają się.

Przebieg wielkości indukowanej siły elektromotorycznej w zależności od kąta (ωt) przedstawiony jest na rys. 121 (przebieg w zależności od czasu t będzie identyczny, gdyż szybkość kątowna (ω) jest wartością stałą).

Widzimy, że siła elektromotoryczna zmienia się według pewnej linii falistej. Zachodzi pytanie — co to jest za linia?

Aby odpowiedzieć na to, robimy następujący rysunek: zakreślamy koło o promieniu równym największej czyli maksymalnej wartości siły elektromotorycznej (rys. 122). Wyobraźmy sobie, że w środku koła umocowana jest wskazówka o długości równej maksymalnej wartości siły elektromotorycznej, mogąca obracać się tak, jak np. wskazówka zegara, lecz w kierunku przeciwnym. Przyjmijmy dla naszej wskazówki jako punkt początkowy położenie poziome oznaczone na rys. 122 literą (O), tak jak np. punktem początkowym dla minutowej wskazówki zegarka jest godzina 12-ta. Przy prędkości kątownej ω nasza wskazówka obróci się w czasie t o kąt (ωt) i przyjmie położenie podane na rys. 122 (linia kreskowana). Rzut wskazówki na prostą pionową równa się odcinkowi $a-b$. Na zasadzie trygonometrii długość tego rzutu wyniesie:

$$\text{odcinek } a-b = \text{długość wskazówki} \cdot \sin \omega t$$

Dla różnych czasów t otrzymamy różne położenia wskazówki i rozmaite wielkości jej rzutów na prostą pionową. Wykreślamy w zależności od czasu t lub kąta ωt rzuty naszej wskazówki na prostą pionową. Otrzymamy linię falistą, przedstawioną na rys. 124. Porównując otrzymane wykresy na rys. 121 i rys. 123, widzimy, że obie linie faliste są takie same. Stąd wniosek: SEM indukowana w ramce zmienia się według sinusa kąta (ωt). Dla każdego czasu (t), a więc dla każdego położenia ramki możemy znaleźć wielkość indukowanej w niej siły elektromotorycznej, która wyrazi się wzorem:

$$e = E_{\max} \cdot \sin \omega t$$

gdzie E_{\max} jest wartością maksymalną wzbudzonej siły elektromotorycznej.

Prąd i napięcie sinusoidalne. Taka właśnie SEM-indukowana powstaje w maszynach elektrycznych. Dzięki charakterowi swej zmienności otrzymała ona nazwę: indukowanej siły elektromotorycznej sinusoidalnie zmiennej. Ponieważ siła elektro-

motoryczna, indukowana w maszynach elektrycznych, wytwarza na zaciskach napięcie, mówimy o napięciu sinusoidalnie zmiennym lub wprost o napięciu sinusoidalnym.

Prąd elektryczny powstały pod wpływem takiego napięcia zwiemy prądem sinusoidalnym.

Wektor. Wróćmy raz jeszcze do rys. 122. Taką wskazówkę, a właściwie odcinek prostej przedstawiający w pewnej skali wielkość maksymalnej SEM indukowanej, który kręci się ze stałą prędkością i którego rzuty na oś dają nam w każdej chwili wielkość indukowanej siły elektromotorycznej, nazywamy wektorem.

Wykres wektorowy. W tym wypadku jest to wektor indukowanej siły elektromotorycznej. Możemy mówić analogicznie o wektorze napięcia czy prądu. Rys. 122 nazywamy wykresem wektorowym SEM. Gdybyśmy do końców ramki przedstawionej na rys. 119 przyłączyli np. żarówkę elektryczną, to popłynąłby prąd. Jeśli na rys. 122 wykreślilibyśmy prócz wektora SEM, jeszcze wektor powstałego prądu oraz wektor napięcia mierzonego na żarówce, otrzymamy wtedy wykres wektorowy obwodu elektrycznego. Na rys. 123 posiadamy prócz wektorowego wykresu SEM jeszcze wykres przebiegu SEM, w zależności od czasu (t) względnie kąta (ωt). Ten wykres nazywamy wykresem czasowym SEM, gdyż podaje on jej zmianę w czasie.

Prądy niesinusoidalne. Istnieją prądy niesinusoidalnie zmienne, których wykres czasowy odbiega znacznie od linii sinusoidalnej (rys. 124). W elektrotechnice spotykamy się z nimi dość rzadko, dlatego nie będziemy się dłużej nimi zajmować, a przez określenie „prąd zmienny“ będziemy rozumieć prąd sinusoidalnie zmienny.

Na rys. 125 przedstawiony jest wykres czasowy i wektorowy prądu zmiennego.

Musimy wejść nieco głębiej w teorię prądu zmiennego i zaznajomić się ze spotykanyimi tam oznaczeniami.

Okres. Prąd zmienny, przechodząc przez kolejne swe wartości, po pewnym czasie osiąga z powrotem taką wartość jaką miał na początku. Mówimy, że prąd zmienia się okresowo. Czas potrzebny by prąd, posiadający pewną wartość początkową, po swych kolejnych zmianach osiągnął ją z powrotem, zwiemy okresem i oznaczamy literą T (rys. 125). Ponieważ na wykresie wektorowym w okresie T zachodzi pełen obrót wektora prądu, a więc o kąt 360° , co odpowiada wartości 2π , można przy stałej prędkości kątowej ω napisać:

$$\omega T = 2\pi; \quad T = \frac{2\pi}{\omega} \dots \dots \dots (30)$$

Pulsacja. Prędkość kątowa ω , jest to prędkość z jaką wektor prądu obraca się na wykresie wektorowym, jak również prędkość z jaką następują po sobie kolejne zmiany prądu elektrycznego. W elektrotechnice otrzymała ona nazwę pulsacji.

Częstotliwość: Okres prądu zmiennego może trwać np. jedną sekundę, $\frac{1}{2}$ sek, $\frac{1}{10}$ sek, $\frac{1}{50}$ sek, $\frac{1}{100}$ sek, itd. a więc dowolną część sekundy. Weźmy dla przykładu prąd, którego okres trwa $\frac{1}{50}$ sek. Możemy powiedzieć, że prąd ten w ciągu 1 sek. swój okresowy przebieg powtórzy 50 razy. Posiada on zmienność 50 okresów na sek. Ilość okresów na sek. nazywamy częstotliwością i oznaczamy literą f . Mamy więc prądy o różnych częstotliwościach: 2, 10, 50, 100, 123 itd. okresów na sek. W przemyśle i do oświetlenia mieszkań dostarczany jest prąd zmienny o częstotliwości $f = 50$ okresów/sek. (oznacza się $50 \sim$ /sek.). Dlatego też częstotliwość ta zwana jest często częstotliwością przemysłową. W Ameryce jest powszechnie używany prąd o częstotliwości $f = 60 \sim$ /sek.

Częstotliwość f jest odwrotnością okresu T , bowiem im większa jest częstotliwość prądu, a więc im więcej posiada on okresów na sekundę, tym okres musi być mniejszy; stąd:

$$T = \frac{1}{f} \dots \dots \dots (31)$$

Korzystając z wzoru $T = \frac{2\pi}{\omega}$

możemy napisać: $\omega = 2\pi f$ lub $f = \frac{\omega}{2\pi} \dots \dots \dots (32)$

Dotychczas mówiliśmy stale o prądzie. Wszystkie jednak nasze rozważania odnoszą się również do napięcia jak i SEM zmiennej.

W odniesieniu do napięcia jak i SEM mówimy również o okresie, pulsacji i częstotliwości.

Amplituda. Przyglądając się rys. 125, przedstawiającemu przebieg prądu w czasie, spostrzegamy, że prąd elektryczny osiąga w pewnym momencie swą największą wartość i to zarówno dla dodatniego jak i dla ujemnego kierunku swego przepływu. Tę największą wartość nazywamy wartością maksymalną lub amplitudą prądu. Oznaczamy ją dużą literą (I) z dodatkiem „max“ (I_{\max}). Analogicznie mamy amplitudę napięcia U_{\max} i siły elektromotorycznej E_{\max} .

Wartość chwilowa. Prąd zmienny i napięcie zmienne posiadają w każdej chwili inną wartość. Tę wartość, jaką w danym momencie posiada prąd względnie napięcie, nazywamy wartością chwilową prądu lub, jeśli mówimy o napięciu, wartością chwilową napięcia. Oznaczamy je małymi literami, a więc dla napięcia mamy (u), dla prądu (i).

Są one określone wzorami:

$$u = U_{\max} \cdot \sin \omega t; \quad i = I_{\max} \cdot \sin \omega t \dots \dots \dots (33)$$

A ogólnie: (wartość chwilowa) = (amplituda) \cdot (sinus ωt)

Istnieją jeszcze dwie bardzo ważne wielkości w teorii prądów zmiennych, a mianowicie: wartość średnia i wartość skuteczna.

Wartość średnia. Na rys. 126 przedstawiony jest wykres cząstki prądu zmiennego. Odcinki pionowe zawarte pomiędzy prostą poziomą a sinusoidą, podają w pewnej skali wartości chwilowe prądu. Prosta pozioma dzieli sinusoidę na dwie części. W punktach przecięcia sinusoidy z poziomą chwilowe wartości prądu są równe zero. Część górna jest półokresem sinusoidy, dla którego wszystkie wartości chwilowe prądu są dodatnie. W części dolnej sinusoidy mamy wartości chwilowe ujemne. Możemy mówić o dodatnim i ujemnym półokresie sinusoidy. Ponieważ oba półokresy są identyczne, a posiadają tylko przeciwne znaki (+) i (-), jasnym jest więc, że suma wartości chwilowych prądu za cały okres równa się zero. Sumę wartości chwilowych prądu płynącego w czasie półokresu możemy jednak znaleźć, gdyż posiadają one wszystkie jednakowy kierunek, są albo wszystkie dodatnie, albo ujemne. Sumę tę przedstawia pole zawarte między poziomą prostą a linią półokresu sinusoidy. Zamieńmy teraz to pole na równoważny mu prostokąt, tzn. o równej powierzchni, mający podstawę równą odcinkowi $(0-\pi)$ (rys. 126). Wysokość tego prostokąta przedstawia wielkość prądu stałego, jaki musiałby płynąć w obwodzie, aby w czasie półokresu przepłynęła ta sama ilość ładunków elektrycznych co przy prądzie zmiennym.

Wielkość tego równoważnego prądu stałego nazywamy wartością średnią prądu zmiennego. Oznaczamy ją literą (I) z dodatkiem (śr) — $I_{\text{śr}}$.

Wartość średnią prądu zmiennego można matematycznie obliczyć. Wynosi ona:

$$I_{\text{śr}} = \frac{2 I_{\text{max}}}{\pi} = 0,637 I_{\text{max}} \dots \dots (34)$$

Wartość skuteczna. Wiemy, że prąd elektryczny, przepływając przez opór, powoduje jego grzanie. W ten sposób energia elektryczna zamienia się na energię cieplną. Jeśli przez opór R płynie prąd stały o natężeniu I , to energia elektryczna zamieniona na energię cieplną wyrazi się wzorem:

$$I^2 \cdot R \cdot t$$

Jeśli przez opór płynie prąd zmienny, to w ciągu czasu t energia stracona w oporze na ciepło równa jest $i^2 \cdot R \cdot t$, gdzie (i) jest wartością chwilową prądu. Energia wydzielona podczas całego okresu jest równa sumie energii chwilowych, wydzielonych przez wartości chwilowe. Możemy mówić o średniej energii wydzielanej na oporze w czasie całego okresu. Wartość prądu stałego, który, płynąc przez opór, wydziela na nim taką samą energię cieplną, jaką wytwarza płynący prąd zmienny, nazywamy wartością skuteczną prądu zmiennego. Wartość ta obliczona matematycznie wynosi:

$$I = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot I_{\text{max}} \dots \dots (35)$$

Wartość skuteczną prądu oznaczamy literą (I).

Podobnie możemy mówić o wartości skutecznej napięcia oraz siły elektromotorycznej. Oznaczamy ją literami U względnie E. Wartość skuteczną napięcia bądź SEM, choć nie posiada tego samego znaczenia co wartość skuteczną prądu, wyraża się podobnym wzorem, a mianowicie:

$$U = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} = 0,707 U_{\max}$$

$$E = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} = 0,707 E_{\max} \quad , \quad . \quad . \quad . \quad (36)$$

We wszystkich omówionych poprzednio urządzeniach elektrycznych prądu stałego jak grzejniki, żarówki oświetleniowe itd. możemy stosować również prąd zmienny. Wówczas we wzorze (13) na moc traconą na ciepło w oporze omowym R:

$$N = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R} = I \cdot U$$

należy brać wartość skuteczną prądu i wartość skutecznego napięcia mierzonego na oporze R.

Przesunięcie fazy. Dwa przewody (1 i 2) umieszczone na okręgu koła w polu magnetycznym wirują ze stałą szybkością kątową ω (rys. 127). Odległość między nimi jest zawsze stała i da się ją wyrazić przy pomocy kąta φ (czyt: fi). W obu przewodach powstają niezależne od siebie siły elektromotoryczne. Wiemy, że indukowane siły elektromotoryczne będą miały wartość zmienną, zależną od położenia przewodu. Każda z nich osiągnie maksymalną wartość w momencie, gdy przewód znajdzie się najbliżej jednego z biegunów magnetycznych, tzn. w punktach (a) i (b). Ponieważ prędkość ω obu przewodów jak również ich wzajemna odległość wyrażona kątem φ jest stała, więc zawsze maksimum indukowanej SEM w przewodzie 2 będzie następować po maksimum indukowanej SEM w przewodzie 1. Przejścia sił elektromotorycznych przez maksima, przez punkty zerowe, jak i przez wszystkie inne wartości chwilowe, nastąpią zawsze później w przewodzie 2 niż w przewodzie 1. Opóźnienie to wyraża wielkość kąta φ . Kąt zaś φ jest niczym innym jak iloczynem stałej szybkościątowej ω i jakiegoś czasu o wielkości t_1 : $\varphi = \omega \cdot t_1$. Widzimy z tego, że kąt φ będzie wyrażał wielkość czasu o jaki indukowana SEM w przewodzie 2 opóźnia się względem indukowanej SEM w przewodzie 1. Wykres czasowy obu indukowanych SEM (rys. 128) będzie przedstawiał dwie identyczne sinusoidy, przesunięte względem siebie o kąt φ . Mówimy, że SEM są przesunięte w fazie o kąt φ , SEM w przewodzie 1 wyprzedza w fazie SEM w przewodzie 2, albo SEM w przewodzie 2 opóźnia się w fazie o kąt φ względem SEM w przewodzie 1. Kąt φ jest różnicą faz między obydwiema siłami elektromagnetycznymi indukowanymi w przewodach.

W obwodach prądu zmiennego napięcie zasilające posiada stałą zmienną wartość. Prąd elektryczny wywołany tym napięciem również zmienia stałą wartość. Nie zawsze prąd i napięcie osiągają w obwo-

dzie elektrycznym swe maksymalne wartości w tym samym czasie. Czasami maksimum prądu nastąpi z pewnym opóźnieniem po maksimum napięcia, lub odwrotnie. Mówimy, że prąd i napięcie są przesunięte w fazie. Na rys. 129 napięcie wyprzedza prąd w fazie o kąt φ . Ponieważ szybkość zmian zarówno napięcia jak i prądu jest ta sama, więc przesunięcie fazy jest stałe. Kiedy zachodzą takie przesunięcia faz między prądem a napięciem i od czego zależy ich wielkość, rodzaj, a więc czy napięcie wyprzedza prąd, czy też prąd wyprzedza w fazie napięcie, dowiemy się, rozpatrując poszczególne rodzaje obwodów prądu zmiennego.

Oporność rzeczywista w obwodzie prądu zmiennego. Na źródło prądu zmiennego np. na maszynę elektryczną załączony jest opór rzeczywisty R jaki stanowi np. żarówka lub grzejnik elektryczny (rys. 130). Jeśli w obwodzie prądu zmiennego załączony jest tylko opór rzeczywisty R , to napięcie i prąd zmienny są w fazie:

$$u = U_{\max} \cdot \sin \omega t$$

$$i = I_{\max} \cdot \sin \omega t$$

Wtedy dla chwilowych, maksymalnych i skutecznych wartości napięcia i prądu zmiennego słuszne jest prawo Ohma w formie poznanej przez nas w rozdz. II o obwodach prądu stałego:

$$i = \frac{u}{R}; \quad I_{\max} = \frac{U_{\max}}{R}; \quad I = \frac{U}{R} \dots \dots \dots (37)$$

Przykład 36.

Dane jest źródło prądu zmiennego o napięciu skutecznym $U = 220 \text{ V}$. Do źródła dołączony jest opór rzeczywisty $R = 40 \Omega$. Znaleźć skuteczną i maksymalną wartość natężenia prądu w obwodzie oraz maksymalną wartość napięcia źródła!

Ze wzoru (37) znajdujemy wartość skuteczną prądu:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{40} = 5,5 \text{ A}$$

Wartość maksymalna napięcia:

$$U_{\max} = \sqrt{2} \cdot U = \sqrt{2} \cdot 220 = 312 \text{ V}$$

a maksymalna wartość prądu:

$$I_{\max} = \sqrt{2} \cdot I = \sqrt{2} \cdot 5,5 = 7,8 \text{ A}$$

Wartość maksymalną prądu możemy znaleźć również ze wzoru (37) a mianowicie:

$$I_{\max} = \frac{U_{\max}}{R} = \frac{312}{40} = 7,8 \text{ A}$$

Uwaga: Jeśli podane są wartości napięcia i prądu zmiennego i nie jest zaznaczone czy są to wartości chwilowe, średnie czy maksymalne, należy rozumieć wtedy, że są to ich wartości skuteczne.

Jeśli mamy kombinacje kilku oporów rzeczywistych połączonych równolegle, szeregowo lub szeregowo-równolegle, wtedy aby znaleźć prądy i spadki napięć w poszczególnych częściach obwodu, postępujemy identycznie jak przy prądzie stałym.

Należy pamiętać, że spadek napięcia zmiennego na oporności rzeczywistej jest zawsze w fazie z prądem zmiennym płynącym przez oporność.

Cewka w obwodzie prądu zmiennego. Rozpatrzmy jak zachowuje się w obwodzie prądu zmiennego cewka o tak małej oporności rzeczywistej, że możemy ją pominąć w naszych rozumowaniach.

Jeśli przez cewkę płynie prąd zmienny, to wytwarza on wokół niej pole magnetyczne. Pole to będzie również zmienne co do gęstości i kierunku linii sił, zależnie od wielkości i kierunku prądu. To zmienne pole magnetyczne, jak już o tym była mowa, indukuje w cewce siłę elektromotoryczną, przeciwdziałającą napięciu przyłożonemu. Mówimy, że cewka przedstawia dla źródła prądu zmiennego oporność indukcyjną i oznaczamy ją literą X_L . Oporność ta jest tym większa im większa jest indukcyjność cewki L oraz im częstsze są zmiany prądu, czyli im większa jest pulsacja prądu ω . Przy każdej bowiem zmianie kierunku prądu musi nastąpić zmiana kierunku pola magnetycznego, a za tym istniejące pole musi być w pierw zniszczone a następnie wytworzone nowe o kierunku przeciwnym. Zadanie to wykonuje prąd elektryczny, który jakby pokonywał wspomnianą oporność indukcyjną równą:

$$X_L = \omega L$$

$$\text{lub } X_L = 2\pi f \cdot L \dots \dots \dots (38)$$

Oporność indukcyjna wyraża się w omach, gdy częstotliwość f jest w \sim /sek., a indukcyjność L w Henrach.

Jeśli załączymy źródło prądu zmiennego na cewkę (rys. 131), to powstały w obwodzie prąd elektryczny, wytwarzając wokół cewki pole magnetyczne, nie nadaży ze swą zmianą za napięciem i nie osiągnie swego maksimum w tym samym czasie co napięcie. Gdy bowiem napięcie przechodzi już przez punkt O i zmienia znak, prąd elektryczny, posiadając jeszcze stary znak napięcia, osiąga dopiero swe maksimum. W następnej chwili prąd podtrzymywany przez zanikające pole a z drugiej strony zmniejszany przez napięcie przeciwnego już znaku ($-$) zaczyna maleć i osiąga wartość zero w momencie, gdy napięcie dojdzie do maksymalnej wartości ujemnej. Dalej wreszcie prąd ma za zadanie wytworzyć drugie pole magnetyczne o kierunku przeciwnym, podczas gdy napięcie znów powróci do zera itd. Dlatego też zmiana prądu elektrycznego będzie następować za zmianą napięcia z tą samą szybkością, lecz ze stałym opóźnieniem. Mówimy, że prąd płynący przez cewkę opóźnia się w fazie względem napięcia źródła i, w tym wypadku, równego mu spadku napięcia na cewce. To opóźnienie fazy prądu względem spadku napięcia na cewce, o ile oporność omowa cewki jest bardzo mała w stosunku do jej oporności indukcyjnej, równe jest zawsze kątowni

90° , zaś względem napięcia źródła jest różne, zależnie od innych oporności włączonych w obwód (rys. 132).

Jeśli pominiemy nieznaczną oporność omową cewki R, to amplituda prądu będzie zależała tylko od oporności indukcyjnej cewki:

$$X_L = \omega L$$

$$\text{a zatem: } I_{\max} = \frac{U_{\max}}{\omega L}$$

$$\text{zaś jego wartość skuteczna: } I = \frac{U}{\omega L}$$

Musimy przy tym pamiętać, że istnieje tu przesunięcie fazy między napięciem i prądem.

Przykład 37.

Mamy układ połączeń jak na rys. 131. Skuteczna wartość napięcia źródła $U = 220$ V. Częstotliwość $f = 50$ \sim /sek. Indukcyjność cewki $L = 1$ H. Znaleźć skuteczną wartość prądu I !

Cewka posiada tak małą oporność omową, że ją pominiemy.

Przesunięcie fazy między napięciem i prądem jest więc $\varphi = 90^\circ$. Napięcie wyprzedza prąd (rys. 132).

Oporność indukcyjna $X_L = \omega L = 2\pi f \cdot L = 2\pi \cdot 50 \cdot 1 = 314$.

Wartość skuteczna prądu płynącego przez obwód na zasadzie wzoru (39) wynosi:

$$I = \frac{U}{\omega L} = \frac{220}{314} = 0,7 \text{ A}$$

Indukcyjność i oporność rzeczywista, połączone szeregowo w obwodzie prądu zmiennego. Źródło prądu zmiennego o napięciu skutecznym U zasila obwód utworzony z połączonych w szeregu: cewki o indukcyjności L i oporności rzeczywistej np. żarówki o oporze R (rys. 133). Należy znaleźć wartość prądu płynącego w obwodzie. Przyjmijmy, że wartość skuteczna prądu wynosi I . Wtedy na zasadzie prawa Ohma możemy napisać: spadek napięcia na żarówce (R) wynosi: $I \cdot R$ i jest w fazie z prądem.

Spadek napięcia na cewce, pomijając jej oporność omową, wynosi: $I \cdot X_L = I \cdot \omega L$ i wyprzedza w fazie prąd o 90° .

Zróbmy wykres wektorowy tego obwodu (rys. 134). Przyjmijmy za kierunek prądu prostą pionową. Wtedy spadek napięcia na żarówce $U_R = I \cdot R$ będący w fazie z prądem można na tej prostej przedstawić odcinkiem (a — b). Spadek napięcia na cewce $U_L = I \cdot \omega L$ wyprzedza prąd w fazie o 90° . Przy przyjętym kierunku obrotu wektorów (kierunek przeciwny do obrotu wskazówki zegara) będzie to odcinek (b — c). Oba spadki napięć winny dać w sumie napięcie przyłożone U . Będzie to odcinek (c — a). Z trójkąta a, b, c, na zasadzie zależności geometrycznej między bokami trójkąta prostokątnego, znajdziemy:

$$U^2 = U_L^2 + U_R^2 = I^2 \cdot \omega^2 \cdot L^2 + I^2 \cdot R^2$$

Równanie to jest geometrycznym dodawaniem prostokątnych do siebie dwóch wektorów.

(Wektor spadku napięcia na oporności rzeczywistej + wektor spadku napięcia na oporności indukcyjnej = wektorowi napięcia przyłożonego).

Wektory przesunięte względem siebie w fazie musimy dodawać geometrycznie.

Z równania $U^2 = I^2 \cdot \omega^2 \cdot L^2 + R^2 \cdot I^2$ znajdujemy wielkość prądu I jako:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \dots \dots \dots (40)$$

Wielkość kąta φ , będącego przesunięciem fazy między napięciem i prądem istniejącym w obwodzie, określa wzór:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R} \dots \dots \dots (41)$$

Ze znalezionej zależności między prądem i napięciem

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

na zasadzie prawa Ohma wynika, że sumaryczną opornością, powstałą z szeregowego połączenia oporności rzeczywistej R i indukcyjnej ωL , na jakie źródło pracuje, jest wyrażenie $\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$. Oznaczamy je literą Z i nazwiemy opornością pozorną obwodu.

Cewka z opornością załączoną szeregowo przedstawia dla źródła prądu zmiennego oporność pozorną, równą

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \dots \dots \dots (42)$$

Prąd zmienny płynący przez obwód wynosi:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

a przesunięciem fazy między napięciem zasilającym i prądem jest kąt φ , którego tangens równa się:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R}$$

Wyrażenie $I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$ i $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R}$

jest prawem Ohma dla obwodu prądu zmiennego, posiadającego oporność indukcyjną i oporność rzeczywistą połączone szeregowo. W obwodzie takim na skutek istnienia oporności omowej napięcie przyłożone nie wyprzedza prądu o pełny kąt 90° lecz o kąt mniejszy (zob. na rys. 134 i 135 wielkości I , U , U_R , U_L i kąt φ). Spadek napięcia na cewce, o ile

opominiey nieznaczną oporność omową cewki względem jej dużej oporności indukcyjnej, wyprzedza prąd płynący przez cewkę o kąt 90° . Spadek napięcia na załączonej oporności omowej jest zawsze w fazie z prądem.

Przykład 38.

Many układ połączeń jak na rys. 133. Napięcie sieci $U = 120$ V; oporność żarówki $R = 360 \Omega$; indukcyjność cewki $L = 1$ H; częstotliwość $f = 50 \sim/\text{sek}$. Znaleźć wielkość prądu, spadki napięć na cewce i żarówce oraz przesunięcie fazy między napięciem zasilającym a prądem!

Oporność indukcyjna:

$$X_L = \omega L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 2\pi \cdot 50 \cdot 1 = 314 \Omega$$

Wartość skuteczna prądu:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} = \frac{120}{\sqrt{360^2 + 314^2}} = \frac{1,2}{4,78} = 0,251 \text{ A}$$

Z tablic trygonometrycznych znajdujemy:

$$\text{tg } \varphi = \frac{\omega L}{R} = \frac{314}{360} = 0,873; \quad \varphi = 41^\circ 10'$$

Spadek napięcia indukcyjny $U_L = I \cdot \omega L = 78,9$ V

Spadek napięcia omowy $U_R = I \cdot R = 90,4$ V

Wykres wektorowy tego układu podaje rys. 136.

Cewka z uwzględnieniem oporności omowej. Dotychczas rozpatrywaliśmy cewkę z pominięciem jej oporności omowej. Dopuszczalne jest to tylko wówczas, gdy mamy dużą częstotliwość prądu zasilającego, czyli gdy oporność indukcyjna cewki jest bardzo duża w stosunku do jej oporności omowej. Jeśli jest inaczej, wówczas cewkę należy rozpatrywać jako szeregowe połączenie jej oporności indukcyjnej (ωL) z jej opornością omową (R). Układ taki nie będzie się niczym różnił od układu poprzednio rozpatrywanego; rozwiązujemy go też w identyczny sposób. Istnieje tu tylko ta różnica, że nie rozpatruje się osobno spadku napięcia na oporności indukcyjnej i na oporności omowej, lecz jedynie całkowity spadek napięcia na cewce, jako sumę geometryczną obu składowych U_L i U_R .

Przykład poniższy przedstawia sposób obliczenia obwodu elektrycznego z załączoną cewką, której oporności omowej nie można pominąć.

Przykład 39.

Na źródło prądu zmiennego o częstotliwości $f = 50 \sim/\text{sek}$ została załączona cewka o indukcyjności $L = 18$ mH i oporności omowej $R = 17 \Omega$. Amperomierz włączony w szereg z cewką wskazał wartość skuteczną prądu płynącego w obwodzie, równą $I = 1,11$ A (rys. 137).

Jaka jest wartość skuteczna napięcia źródła?

Znajdujemy oporność indukcyjną cewki $X_L = \omega L = 2\pi \cdot f \cdot L$.
Ponieważ we wzorze tym indukcyjność L należy wstawić w henrach,
a mamy ją podaną w milihenrach, więc najpierw przeliczymy milihenry
na henry:

$$1 \text{ mH} = \frac{1}{1000} \text{ H} = 0,001 \text{ H}, \text{ więc } 18 \text{ mH} = 0,018 \text{ H}$$

Stąd oporność indukcyjna:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,018 = 5,7 \Omega$$

Ze wzoru (42) znajdujemy oporność pozorną cewki:

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} = \sqrt{17^2 + 5,7^2}$$

Widzimy tutaj, że na wielkość oporności pozornej cewki główny
wpływ wywiera jej oporność omowa. Dlatego nie możemy jej pominąć.

Z wzoru (40) znajdujemy wartość skuteczną napięcia źródła:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} = \frac{U}{Z}, \text{ czyli } U = I \cdot Z$$

$$U = 1,11 \cdot 18 = 20 \text{ V}$$

Przyjmijmy teraz, że napięcie źródła posiada częstotliwość $f =$
 $= 5000 \text{ } \sim/\text{sek}$ i zobaczymy jakie będą teraz oporności indukcyjne i omo-
we cewki.

Dla częstotliwości $f_1 = 5000 \text{ } \sim/\text{sek}$ oporność indukcyjna wynosi

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 5000 \cdot 0,018 = 570 \Omega$$

Oporność omowa cewki pozostała ta sama i wynosi: $R = 17 \Omega$

Obliczamy teraz oporność pozorną cewki:

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} = \sqrt{17^2 + 570^2} = \sqrt{289 + 324900} \cong 570 \Omega$$

Z liczb pod pierwiastkiem wynika, że R^2 w porównaniu z $\omega^2 \cdot L^2$
jest bardzo małe i nie wpłynie na wartość Z .

Widać stąd, że dla dużej częstotliwości oporność omową można
pominąć. Dlatego w tym wypadku można przyjąć, że oporność pozorna
cewki Z jest równa jej oporności indukcyjnej X_L

$$Z = X_L = 570 \Omega$$

Kondensator w obwodzie prądu zmiennego. Wiemy,
że gdy na źródło prądu stałego załączymy kondensator, to w pierwszym
momencie popłynie krótkotrwały prąd ładujący płytki kondensatora. Prąd
ten maleje stopniowo i przestaje płynąć zupełnie w chwili, gdy napięcie
na kondensatorze zrówna się z napięciem źródła.

Wówczas nawet gdy odłączymy źródło prądu, kondensator pozostaje
naładowany i istnieje na nim poprzednie napięcie. Z chwilą zwarcia na-
ładowanego kondensatora, w miarę zrównywania się gęstości elektronów

na obu płytkach, popłynie z niego również krótkotrwały i malejący prąd wyładowania w kierunku przeciwnym, który zniknie zupełnie, gdy napięcie między płytkami będzie równe zeru (rys. 57).

Podobnie przebiega zjawisko w obwodzie prądu zmiennego z kondensatorem (rys. 138), jednakże okoliczność, że napięcie źródła prądu zmiennego zmienia okresowo swą biegunowość, ładując raz jedną płytkę kondensatora ujemnie a drugą dodatnio a za chwilę odwrotnie, sprawia, że kondensator co chwila ładuje się i rozładowuje. Powoduje to stały przepływ prądu zmiennego w obwodzie prądu zmiennego z kondensatorem. Zrozumiemy to jaśniej z rys. 139 i przy pomocy poniższego wyjaśnienia.

Zacznijmy nasze rozważania od chwili, gdy napięcie zmienne na źródle osiągnęło swą maksymalną wartość.

Kondensator jest wówczas naładowany. Wielkości napięć na kondensatorze i źródle są sobie równe i prąd nie płynie (a). W następnej chwili, gdy napięcie na źródle prądu zmiennego zaczyna maleć, kondensator skutkiem istnienia na nim dużego napięcia, równego maksymalnemu napięciu źródła, staje się sam jakby źródłem prądu elektrycznego, który popłynie od kondensatora do źródła. Kondensator wyładowuje się (b). Z chwilą gdy napięcie na źródle jak i na kondensatorze spadło do zera, prąd wyładowania kondensatora osiąga swą maksymalną wartość ujemną (c). Teraz napięcie na źródle, przeszedłszy przez zero zaczyna rosnąć i ładuje kondensator. Ponieważ jednak napięcie na biegunach źródła zmieniło znaki, płytka kondensatora, która na początku naszych rozważań była dodatnia, będzie teraz ujemną, a poprzednia ujemna stanie się dodatnią. W miarę napływania ładunków do kondensatora prąd maleje, zaś napięcie na kondensatorze rośnie. Gdy kondensator się naładuje, czyli napięcie na nim zrówna się z maksymalną ujemną wartością źródła, prąd w obwodzie przestaje płynąć (e). Napięcie na źródle, przeszedłszy przez swe ujemne maksimum, zaczyna teraz znów maleć. Napięcie na kondensatorze staje się przyczyną przepływu prądu wyładowania w kierunku odwrotnym do uprzedniego prądu ładowania (f). Gdy napięcie na źródle i na kondensatorze osiąga wartość zero, w obwodzie przepływa maksymalny prąd wyładowania (g). Po przejściu przez zero, napięcie na źródle zaczyna rosnąć, powodując ładowanie płytek kondensatora odwrotnymi znakami, niż je miał ostatnio (h). Z chwilą naładowania kondensatora do maksymalnego napięcia, równego maksymalnemu dodatniemu napięciu źródła, prąd ładowania przestaje płynąć (i).

W ten sposób w ciągu jednego, pełnego okresu zmiany napięcia na źródle, otrzymaliśmy dwukrotne wyładowanie i naładowanie kondensatora, co powoduje, jak już na początku zaznaczono, nieustanny przepływ prądu zmiennego w obwodzie złożonym z kondensatora i źródła prądu zmiennego.

Z przebiegu napięcia i prądu (rys. 138) wynika, że prąd (I) w obwodzie wyprzedza napięcie (U) źródła i równy mu spadek napięcia na kondensatorze o kąt $\varphi = 90^\circ$.

Prąd ten będzie tym większy, im większa jest częstotliwość (ω lub f) napięcia zasilającego, czyli im częstsze są jego zmiany oraz im kondensator zdolny jest pomieścić więcej ładunków elektrycznych, czyli im większa jest jego pojemność (C).

Widzimy więc, że ω i C , wpływając na wielkość prądu, stanowią o oporności jaką dla prądu zmiennego przedstawia kondensator.

Oporność ta, zwana opornością pojemnościową, wyraża się następująco:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2 \pi \cdot f \cdot C} \dots \dots \dots (43)$$

Otrzymamy ją w omach (Ω), gdy częstotliwość (f) wstawimy w okresach, sekundę (\sim /sek), a pojemność (C) w Faradach (F).

Na zasadzie prawa Ohma, o ile na źródło prądu zmiennego o wartości skutecznej napięcia (U) załączony jest tylko kondensator (C), wówczas w obwodzie płynie prąd:

$$I = \frac{U}{X_C} = U \cdot \omega \cdot C \dots \dots \dots (44)$$

W tym wypadku prąd wyprzedza w fazie napięcie źródła i równy mu spadek napięcia na kondensatorze o kąt $\varphi = 90^\circ$, jak to podaje wykres wektorowy, rys. 140.

Ogólnie: prąd płynący w obwodzie prądu zmiennego zawierającym kondensator, bez względu na to czy oprócz kondensatora znajduje się jeszcze oporność omowa lub indukcyjna, będzie zawsze wyprzedzał spadek napięcia na kondensatorze o kąt 90° , podczas gdy względem napięcia źródła może być rozmaicie przesunięty w fazie, o czym się później przekonamy.

Kondensator i oporność rzeczywista, szeregowo połączone w obwodzie prądu zmiennego. Rys. 141 przedstawia obwód prądu zmiennego, w którym kondensator C połączony w szereg z oporem R zasilany jest ze źródła prądu zmiennego o napięciu U . Szukamy prądu płynącego w obwodzie. Tak jak w wypadku cewki połączonej szeregowo z opornością, możemy znaleźć spadki napięć na oporze R i kondensatorze C . Niech prąd płynący w obwodzie wynosi I .

Spadek napięcia na oporze wyniesie $I \cdot R$

Spadek napięcia na kondensatorze, tzw. pojemnościowy spadek napięcia, wyniesie: $I \cdot X_C = I \cdot \frac{1}{\omega C}$

Wiemy, że napięcie na kondensatorze opóźnia się w fazie o 90° względem prądu. Jako kierunek prądu I przyjmujemy prostą pionową (rys. 142). Spadek napięcia na oporze R jest w fazie z prądem i można go wyrazić odcinkiem ($a - b$). Spadek napięcia na kondensatorze opóźnia się o 90° względem prądu, a więc przy przyjętym kierunku obrotu wek-

torów, oznaczonym na rys. 142, przedstawia go odcinek (b — c). Suma geometryczna spadków napięć na R i C daje wielkość napięcia przyłożonego U. Stąd odcinek (a — c) wyrazi nam napięcie U.

Piszemy równanie dla trójkąta prostokątnego a, b, c

$$U^2 = U_R^2 + U_C^2 = I^2 \cdot R^2 + I^2 \cdot \frac{1}{\omega^2 C^2}$$

Wielkość prądu wyniesie:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}} \text{ oraz } \operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{\omega C \cdot R}$$

Źródło pracuje więc na oporność pozorną $Z = \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}$

Streszczając, otrzymujemy:

Kondensator połączony w szereg z opornością omową przedstawia dla źródła prądu oporność pozorną:

$$Z = \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}} \dots \dots \dots (45)$$

Prąd płynący przez kondensator wynosi:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}} \dots \dots \dots (46)$$

a kąt przesunięcia fazy między napięciem i prądem określa wzór:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{\omega C \cdot R} \dots \dots \dots (47)$$

Skutkiem istnienia oporu omowego przesunięcie fazy między prądem a napięciem zasilającym będzie tu zawsze mniejsze od 90° .

Wyrażenie $I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}}$ oraz $\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{\omega C \cdot R}$ jest pra-

wem Ohma dla obwodu prądu zmiennego, w którym mamy załączone w szereg: kondensator i opór rzeczywisty.

Przykład 40.

Mamy obwód elektryczny przedstawiony na rys. 141. Napięcie źródła $U = 120 \text{ V}$. Opór obwodu $R = 100 \Omega$. Kondensator posiada pojemność $C = 10 \mu\text{F} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ F}$. Częstotliwość $f = 50 \text{ } \sim/\text{sek}$. Szukamy wielkości prądu płynącego w obwodzie i jego przesunięcia w fazie względem napięcia sieci.

Znajdujemy oporność pojemnościową kondensatora:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} = 318 \ \Omega$$

Prąd I na podstawie wzoru (46) wynosi:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}} = \frac{120}{\sqrt{100^2 + 318^2}} = 0,36 \text{ A}$$

^a przesunięcie fazy między napięciem i prądem wyniesie:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi &= \frac{-1}{\omega C \cdot R} = \frac{318}{100} = 3,18 \\ \varphi &= 72^\circ 30' \end{aligned}$$

Omowa spadek napięcia na oporze R wynosi:

$$U_R = I \cdot R = 0,36 \cdot 100 = 36 \text{ V}$$

Pojemnościowy spadek napięcia na kondensatorze C wynosi:

$$U_C = I \cdot \frac{1}{\omega C} = 0,36 \cdot 318 = 114,5 \text{ V}$$

Wykres wektorowy przedstawia rys. 143.

Kondensator, cewka i oporność, połączone w szereg. Na źródło prądu zmiennego załączony został obwód elektryczny składający się z kondensatora o pojemności C , cewki o indukcyjności L i oporu rzeczywistego R , połączonych w szereg (rys. 144). Szukamy wielkości prądu I płynącego w obwodzie.

Napięcie źródła wynosi U .

Poszczególne spadki napięć istniejące w obwodzie znajdziemy tak jak poprzednich przykładach jako iloczyn prądu I przez oporność pojemnościową X_C , indukcyjną X_L i omową R . Założmy, że w obwodzie płynie prąd I .

Spadek napięcia na kondensatorze wynosi:

$$I \cdot X_C = I \cdot \frac{1}{\omega C}$$

Spadek napięcia na cewce wynosi:

$$I \cdot X_L = I \omega L$$

Spadek napięcia na oporze wynosi: $I \cdot R$

Wiemy, że spadek napięcia na kondensatorze opóźnia się o 90° w fazie względem prądu, podczas gdy spadek napięcia na cewce wyprzedza prąd o 90° .

Wykreślmy te spadki napięć, przyjmując jako kierunek prądu prostą pionową (rys. 145). Spadek napięcia na cewce, tzn. spadek indukcyjny, przedstawia odcinek (0 — a). Spadek napięcia na kondensatorze, czyli spadek pojemnościowy, wyraża odcinek (0 — b). Widzimy, że oba spadki napięć leżą na prostej poziomej, a kierunki ich są przeciwnie. Stąd wniosek, że spadki napięć: indukcyjny i pojemnościowy przeciwdziałają sobie. Sumaryczny spadek napięcia, zwany spadkiem indukcyjno-pojemnościowym X wyniesie więc $X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$ (spadek indukcyjny przyjmujemy jako dodatni).

Jasnym jest więc, że gdy spadek indukcyjny będzie większy niż pojemnościowy, obwód będzie się zachowywał tak, jakby znajdowała się w nim tylko cewka, ale o mniejszej indukcyjności (kondensator będzie pozornie jakby zmniejszał indukcyjność cewki).

Jeśli zwrócimy uwagę na to, że wektor (0 — b) jest tym dłuższym im mniejsza jest pojemność kondensatora, wówczas stwierdzimy: jeśli przeważa spadek pojemnościowy, czyli mamy w obwodzie mały kondensator: zachowanie obwodu będzie takie, jakby istniał w nim tylko kondensator ale o większej pojemności (indukcyjność cewki jakby zwiększała pozornie pojemność kondensatora).

Załóżmy, że w obwodzie przeważa indukcyjność. W tym wypadku sumaryczny spadek indukcyjno-pojemnościowy będzie miał charakter indukcyjny czyli będzie wyprzedzał w fazie prąd o 90° . Wykres wektorowy obwodu dla tego wypadku podaje rys. 146. Spadek omowy $I \cdot R$ wyraża odcinek (0 — a). Spadek indukcyjny $I \cdot \omega L$ wyraża odcinek (a — b). Spadek pojemnościowy $I \cdot \frac{1}{\omega C}$ wyraża odcinek (a — c). Sumaryczny spadek indukcyjno-pojemnościowy ($U_L - U_C$) wyrazi odcinek (a — d). Odcinek 0 — d przedstawia jak w poprzednich przykładach napięcie przyłożone U.

Stąd: $U^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2 = I^2 \cdot R^2 + I^2 \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2$

$$\text{a prąd: } I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}} \dots \dots \dots (43)$$

Prąd ten będzie przesunięty w fazie względem napięcia o kąt φ , którego wielkość określa wzór:

$$\text{tg } \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \dots \dots \dots (49)$$

Przykład 41.

Mamy obwód jak na rys. 144 o napięciu źródła $U = 220 \text{ V}$. Opór $R = 200 \Omega$. Indukcyjność cewki $L = 2 \text{ H}$. Pojemność kondensatora $C = 10 \mu\text{F} = 10^{-5} \text{ F}$.

Częstotliwość napięcia przyłożonego $f = 50 \sim / \text{sek.}$

Znajdujemy:

Pulsację prądu: $\omega = 2 \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314$

Opór indukcyjny: $X_L = \omega L = 314 \cdot 2 = 628 \ \Omega$

Opór pojemnościowy: $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \cdot 10^{-5}} = 318 \ \Omega$

Opór rzeczywisty: $R = 200 \ \Omega$

Opór indukcyjno-pojemnościowy:

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 628 - 318 = 310 \ \Omega$$

Prąd w obwodzie wyniesie:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{220}{\sqrt{200^2 + 310^2}} = 0,597 \text{ A}$$

a jego przesunięcia fazy równa się:

$$\text{tg } \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = \frac{310}{200} = 1,55$$

$$\varphi = 57^\circ 10'$$

Spadek napięcia omowy:

$$U_R = I \cdot R = 0,597 \cdot 200 = 119,4 \text{ V}$$

Spadek napięcia indukcyjny:

$$U_L = I \cdot \omega L = 376 \text{ V}$$

Spadek napięcia pojemnościowy:

$$U_C = I \cdot \frac{1}{\omega C} = 190 \text{ V}$$

Spadek napięcia indukcyjno-pojemnościowy wynosi:

$$U_L - U_C = I \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = 0,597 \cdot 310 = 186 \text{ V}$$

Wykres wektorowy tego obwodu przedstawiony jest na rys. 147.

Jeśli w obwodzie przeważa oporność pojemnościowa X_C wówczas

spadek popojemnościowo-indukcyjny $U_L - U_C = I \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)$

opóźnia się w fazie o kąt 90° względem prądu płynącego przez obwód.

Wykres wektorowy takiego obwodu przedstawia rys. 148. Znow odcinek

(O — d) wyraża wielkość napięcia U . Przeto:

$$U^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2 = I^2 \cdot R^2 + I^2 \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2$$

$$\text{a prąd: } I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}}, \quad \text{tg } \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$

Wzór dla wartości skutecznej prądu i jego przesunięcia fazowego jest tu taki sam jak dla wypadku przeważania indukcyjności w obwodzie. Jednak wyrażenie $\left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)$ jest ujemne bowiem $\frac{1}{\omega C} > \omega L$

a stąd $\text{tg } \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$ i kąt φ są ujemne, dające w ten sposób

do poznania, że prąd wyprzedza w fazie napięcie przyłożone.

Przykład 42.

Mamy dane jak dla przykładu (41), z tą różnicą, że kondensator posiada pojemność $C = \mu \text{ F}$. Wtedy oporność pojemnościowa wynosi:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{10^6}{314 \cdot 4} = 795 \Omega$$

Oporność pojemnościowo-indukcyjna równa się teraz:

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C} = + 628 - 795 = - 167 \Omega$$

Prąd płynący w obwodzie wynosi:

$$\frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}} = \frac{220}{\sqrt{200^2 + (-167)^2}} = 0,847 \text{ A}$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = \frac{-167}{200} = -0,835$$

$$\varphi = -40^\circ. \text{ (Przewaga pojemności!)}$$

Spadki napięć wynoszą:

$$\text{omowy: } U_R = I \cdot R = 0,847 \cdot 200 = 169,4 \text{ V}$$

$$\text{pojemnościowy: } X_C = I \frac{1}{\omega C} = 674 \text{ V}$$

$$\text{indukcyjny: } X_L = I \cdot \omega L = 533 \text{ V}$$

indukcyjno-pojemnościowy:

$$X = X_L - X_C = I \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = -141 \text{ V}$$

Wykres wektorowy dla tego przykładu przedstawia rys. 149.

Rezonans napięć. Źródło prądu zmiennego w obu ostatnich przykładach pracuje na oporność pozorną:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \dots \dots \dots (50)$$

Oporność tego układu osiąga swą najmniejszą wartość, jeśli oporności indukcyjna i pojemnościowa znoszą się. Jest to praktycznie zupełnie możliwe, gdyż jak już wiemy, obie oporności przeciwdziałają sobie.

Przez odpowiedni dobór pojemności lub indukcyjności możemy osiągnąć, że:

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \quad \text{czyli} \quad \omega L = \frac{1}{\omega C}$$

Wtedy oporność pozorną Z jest równa oporności omowej R ($Z = R$) i płynąć będzie wówczas w obwodzie największy prąd:

$$I = \frac{U}{Z}$$

Prąd ten przepływając przez kondensator i cewkę wywoła na nich maksymalne spadki napięcia, które jednak, posiadając przeciwne znaki, nawzajem się znoszą. Spadki napięć mogą osiągnąć wartości znacznie przewyższające napięcie źródła. Dla przykładu 42 otrzymamy w tym wypadku prąd

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220}{200} = 1,1 \text{ A}$$

a spadek napięcia na cewce równy spadkowi napięcia na kondensatorze lecz o przeciwnym znaku:

$$I \cdot \omega L = 1,1 \cdot 628 = 691 \text{ V}$$

Jak widzimy jest on dużo większy od napięcia źródła $U = 220 \text{ V}$.

Przebiecie. Mówimy, że na cewce lub kondensatorze otrzymujemy maksymalne tzw. przebiecie rezonansowe określone stosunkiem:

$$\frac{\text{Spadek napięcia indukcyjny (pojemnościowy)}}{\text{napięciu źródła}} = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U}$$

Aby osiągnąć warunek $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ zamiast dobierać wartość pojemności kondensatora względnie indukcyjności cewki, możemy dobrać od-

powiednio częstotliwość źródła f . Ponieważ obie oporności: indukcyjna i pojemnościowa zależą od pulsacji źródła, a tym samym od jego częstotliwości

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

to przy pewnej jej wartości równej

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}} \text{ otrzymamy } \omega L = \frac{1}{\omega C}$$

Zjawisko to zostało nazwane rezonansem, a częstotliwość (f), przy której zachodzi warunek $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ częstotliwością rezonansową obwodu.

Dla wypadku rezonansu przy szeregowym połączeniu kondensatora i cewki otrzymujemy na oporności indukcyjnej i pojemnościowej napięcie znacznie większe od napięcia źródła zasilającego. Dlatego układ ten zwiemy rezonansem napięć.

W technice prądów silnych, rezonans napięć jest groźny, gdyż powoduje znaczne przepięcia w obwodach, mogące doprowadzić do przebicia dielektryka kondensatora lub uzwojenia cewki, a tym samym do zniszczenia instalacji. Staramy się też dobrać takie wartości indukcyjności i pojemności obwodu, aby dla częstotliwości przemysłowej $f = 50$ /sek pracować zdala od rezonansu, czyli aby w obwodzie

$$\omega L \gg \frac{1}{\omega C} \text{ lub } \frac{1}{\omega C} \gg \omega L$$

W radiotechnice, rezonans napięć posiada szerokie zastosowanie, gdyż pracując przy bardzo małych prądach obwodu, wykorzystuje się tam właśnie przepięcia powstałe na kondensatorze lub cewce.

Rezonans prądów. Prócz rezonansu napięć istnieje jeszcze tzw. rezonans prądów, występujący w układzie kondensatora i cewki połączonych równolegle (rys. 150).

Dla uproszczenia założymy, że w obwodzie utworzonym z cewki L i kondensatora C nie ma oporności omowej. Jak wiemy między napięciem i prądem płynącym przez cewkę lub kondensator istnieje przesunięcie fazy wynoszące 90° . Ponieważ w tym układzie zarówno na kondensatorze jak i na cewce jest to samo napięcie, równe napięciu źródła U , to prądy płynące w kondensatorze i cewce muszą być przesunięte względem napięcia źródła o kąt $\varphi = 90^\circ$. Prąd kondensatora wyprzedza w fazie napięcie o 90° , podczas gdy prąd płynący w cewce opóźnia się względem tego samego napięcia o 90° . Jasnym jest więc, że prądy te znoszą się nawzajem, jak to przedstawia wykres wektorowy (rys. 151).

Dla wypadku $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ prądy te są sobie równe i posiadają

$$\text{znaki przeciwne: } I_L = I_C = \frac{U}{\omega L} = U \cdot \omega C$$

Pomimo, że oba prądy składowe mają wartość równą

$$I_L = I_C = \frac{U}{\omega C} = U \cdot \omega C$$

w obwodzie zewnętrznym prąd, I będący sumą geometryczną prądów I_L i I_C równa się zeru. Jest to jednak wypadek praktycznie nieosiągalny, wynikający z pominięcia oporności omowej obwodu. W rzeczywistości płynąć będzie zawsze mały zasilający prąd I , dużo mniejszy od prądu I_L i I_C .

Przetężenie. Mamy więc duże prądy w obwodzie mimo małego prądu płynącego ze źródła. Otrzymujemy tzw. przetężenie rezonansowe wyrażone stosunkiem:

$$\frac{\text{Prąd płynący przez kondensator (cewkę)}}{\text{Prąd zasilający, płynący ze źródła}} = \frac{I_L}{I} = \frac{I_C}{I}$$

Zjawisko to nazywamy rezonansem prądów. Układ ten posiada również jak i rezonans napięć szerokie zastosowanie w radiotechnice. Dokładne obliczenie prądów i napięć w obwodach o równoległym połączeniu R , L i C natrafia na znaczne trudności i wymaga stosowania specjalnych metod matematycznych, tak że ograniczamy się jedynie do ogólnego podania zjawiska rezonansu prądów.

Musimy tutaj nadmienić, że dla tych obwodów, tak jak dla obwodu prądu stałego, słuszne jest pierwsze prawo Kirchhoffa. Należy jednak dla prądu zmiennego brać nie sumę algebraiczną wartości prądów do węzła dopływających i z niego odpływających, lecz ich sumę geometryczną, czyli wektorową. Z powodu przesunięć fazowych poszczególnych prądów sumowanie i odejmowanie ich jest trudne i skomplikowane.

Praca i moc prądu zmiennego. Mówiąc o obwodach prądu stałego, poznaliśmy pojęcie mocy. Moc była tam określona iloczynem prądu przez napięcie $N = U \cdot I$ i mierzona w jednostkach mocy: watach lub kilowatach.

Praca była iloczynem mocy i czasu $A = U \cdot I \cdot t$, mierzona w watasekundach lub w kilowato-godzinach (KWh).

Podobnie dla obwodu prądu zmiennego moc wyraża się iloczynem wartości chwilowych prądu i napięcia $n = u \cdot i$. Ponieważ napięcie i prąd są zmienne w czasie, więc moc prądu zmiennego w ten sposób wyrażona jest również zmienna w czasie. Zwiemy ją mocą chwilową. Suma mocy chwilowej za czas jednej sekundy da nam wielkość średniej mocy, jaką pobiera obwód prądu ze źródła. Postaramy się znaleźć wartość mocy średniej.

Jeśli obwód prądu zmiennego składa się tylko z oporności rzeczywistych, to między prądem i napięciem nie istnieje przesunięcie fazy. Według prawa Ohma mamy wtedy wartość skuteczną prądu, określoną

$$\text{jako } I = \frac{U}{R}$$

gdzie: U — wartość skuteczna napięcia
 R — opór rzeczywisty obwodu

Z drugiej strony określiliśmy wartość skuteczną prądu zmiennego jako równą wartości prądu stałego, który wydziela na oporze R tę samą moc. Stąd wynika, że moc średnia prądu zmiennego pracującego tylko na opory rzeczywiste wynosi: $N = I^2 \cdot R$

lub podstawiając $I = \frac{U}{R}$ otrzymamy $N = I \cdot U$

gdzie I i U są wartościami skutecznymi prądu i napięcia.

Rys. 152 przedstawia wykres czasowy prądu i napięcie obwodu, w którym istnieją tylko opory rzeczywiste (żarówka, grzejniki). Poczyn wartości chwilowych prądu i napięcia, a więc wartość chwilową mocy, przedstawia krzywa kreskowana. Z wykresu rys. 152 widzimy, że moc chwilowa jest zmienna w czasie. Stwierdzić to można doświadczalnie, a mianowicie jeśli do źródła prądu zmiennego o dość małej częstotliwości ($10 \sim / \text{sek}$) przyłączymy żarówkę, to będzie ona migać. Pole zakreskowane na rys. 152 przedstawia wielkość mocy oddanej przez źródło. Jeśli pole to zamienimy na prostokąt o tej samej powierzchni i o podstawie równej jednej sekundzie (skala czasu na prostej poziomej), to wysokość jego będzie się równać mocy średniej $N = U \cdot I$.

Jeśli w obwodzie oprócz oporu znajduje się jeszcze cewka lub kondensator, to powstanie przesunięcie fazy między prądem i napięciem. Wykres czasowy prądu, napięcia i mocy chwilowych przedstawia dla tego wypadku rys. 153. Widzimy, że pole dodatnie mocy zmalało, powstało natomiast pole mocy ujemnej, leżące pod linią poziomą (t). Moc ujemna jest to moc, jaką obwód zamiast pobierać oddaje źródłu prądu zmiennego np. w chwilach gdy kondensator wyładowuje się. Moc średnia pobierana przez obwód (dodatnia) zmniejsza się. W krańcowym wypadku, gdy w obwodzie mamy tylko kondensator lub tylko cewkę, a więc przesunięcie fazy między napięciem i prądem równe 90° , otrzymujemy wykres rys. 154. Część dodatnia i ujemna wykresu mocy są sobie równe. W czasie jednego ćwierć okresu zmiany prądu, zostaje pobrana przez obwód taka sama moc jak w następnym ćwierć-okresie z powrotem oddana źródłu przez obwód. W rezultacie źródło nie daje mocy. Jest to zupełnie zrozumiałe. Jeśli weźmiemy np. kondensator załączony na źródło prądu zmiennego, to najpierw płynie prąd ładujący kondensator do najwyższego napięcia źródła — źródło wydaje energię, w następnej jednak chwili płynie prąd rozładowania, w czasie którego kondensator oddaje energię pobraną z powrotem do źródła itd. Obwód taki nie będzie więc czerpał energii ze źródła prądu, a tym samym i mocy.

Podobne zjawisko zachodzi, jeśli do źródła prądu zmiennego załączymy cewkę nie posiadającą praktycznie oporności omowej. W jednej ćwiartce okresu cewka pobiera ze źródła energię na wytworzenie pola magnetycznego, a w następnej ćwiartce okresu energia nagromadzona w tym polu zostaje z powrotem oddana źródłu. Źródło zatem nie traci energii.

Oporność bezwrotna i urojona. Dlatego też zarówno oporność indukcyjna jak i pojemnościowa zostały nazwane opornościami bezwrotnymi lub urojonymi, nie pobierają one bowiem energii ze źródła prądu i pojęcie oporu, jako czegoś co zużywa energię, jest w tym wypadku urojone. Stąd pochodzą obie nazwy.

Oporności urojone nie pobierają energii ze źródła prądu zmiennego, a powodują jedynie przesunięcie fazy między napięciem i prądem.

Musimy się teraz zastanowić, jaką moc ze źródła prądu zmiennego będzie pobierać obwód, składający się z kondensatora i oporu lub cewki i oporu, tzn. jeśli przesunięcie fazy między napięciem zasilającym i prądem jest mniejsze od 90° .

Odpowiedź na to pytanie znajdziemy z łatwością, rozwiązując następujący przykład:

Przykład 43.

Na źródło prądu zmiennego załączony jest opór R i cewka o indukcyjności L (rys. 155). Napięcie źródła wynosi U . Prąd, który płynie w obwodzie równa się I .

Znajdujemy:

Omowy spadek napięcia na oporze R : $U_R = I \cdot R$.

Indukcyjny spadek napięcia na cewce: $X_L = I \cdot \omega L$.

Wykres wektorowy tego obwodu podaje rys. 156.

Wiemy, że cewka nie pobiera mocy ze źródła prądu, a tylko powoduje przesunięcie fazy. Moc, jaką daje źródło, zamienia się na ciepło tylko na oporze R . Będzie to iloczyn napięcia istniejącego na oporze R przez wartość prądu płynącego przez ten opór. Napięcie na oporze wynosi $I \cdot R$, lub na zasadzie trygonometrii, znajdując je z wykresu 156, jako rzut wektora U na kierunek prądu I , możemy napisać:

$$I \cdot R = U \cdot \cos \varphi$$

Prąd płynący w obwodzie równa się I . A więc moc oddana przez źródło wynosi $N = I \cdot I \cdot R = I \cdot U \cdot \cos \varphi$. Przy stałych wartościach U i I jest ona tym większa im większy jest $\cos \varphi$.

Moc rzeczywista. W granicznych wypadkach otrzymujemy:

1. Jeśli mamy tylko opór R w obwodzie, to $\varphi = 0$ $\cos \varphi = 1$, a więc moc $N = U \cdot I$.

2. Jeśli mamy tylko cewkę lub kondensator, to $\varphi = 90^\circ$ względnie $\varphi = -90^\circ$, $\cos \varphi = 0$, a więc moc $N = 0$. W obwodzie prądu zmiennego moc pobierana przez obwód, tak zwana moc rzeczywista, czyli taka jaką rzeczywiście możemy zamienić na moc mechaniczną czy cieplną, wynosi $N_{rz} = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ i mierzy się w watach lub kilowatach.

Moc pozorna i moc urojona. Istnieją jeszcze dwie inne moce, a mianowicie: Moc pozorna $N_p = U \cdot I$ mierzona w wolt-amperech

(VA) lub kilowolt-amperach (kVA), oraz moc urojona $N_u = U \cdot I \cdot \sin \varphi$, powstała z pomnożenia prądu przez spadek napięcia na oporność urojonej (cewce lub kondensatorze). Mierzmy ją w warach (war).

Rozróżniamy więc trzy moce:

$$1. \text{ Moc rzeczywista } N_{rz} = U \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ (wat lub kilowat)} \quad (51)$$

$$2. \text{ Moc urojona } N_u = U \cdot I \cdot \sin \varphi \text{ (war)} \quad (52)$$

$$3. \text{ Moc pozorna } N_p = U \cdot I \text{ (VA lub kVA)} \quad (53)$$

Związek między tymi mocami przedstawia wzór:

$$N_p^2 = N_{rz}^2 + N_u^2 \quad (54)$$

Jakie znaczenie posiadają poszczególne moce? W tym celu rozwiążmy następujące dwa przykłady:

Przykład 44.

Prądnicą elektryczną prądu zmiennego o napięciu $U = 210 \text{ V}$ i największym dopuszczalnym prądzie obciążenia $I = 5 \text{ A}$, załączona została do silnika elektrycznego, którego uzwojenie posiada taką indukcyjność, że wywołane przez nią przesunięcie fazy między napięciem zasilającym i prądem wynosi kąt φ_1 , którego $\cos \varphi_1 = 0,45$ (rys. 157).

Moc rzeczywista jaką silnik pobiera przy tym prądzie $N_{rz} = U \cdot I \cdot \cos \varphi_1 = 210 \cdot 5 \cdot 0,45 = 475 \text{ wat}$. Jest to moc, którą silnik zdolny jest zamienić rzeczywiście na moc mechaniczną.

Przykład 45.

Tę samą prądnicę załączono na inny silnik posiadający $\cos \varphi_2 = 0,9$. Wtedy przy największym dopuszczalnym dla prądniczy prądzie $I = 5 \text{ A}$ otrzymamy moc rzeczywistą silnika:

$$N_{rz} = U \cdot I \cdot \cos \varphi_2 = 210 \cdot 5 \cdot 0,9 = 950 \text{ wat}$$

Prądnicą jest ta sama, ale w drugim wypadku otrzymujemy dwa razy większą moc jaką silnik zdolny jest zamienić na moc mechaniczną. Dzieje się to dla tego, że $\cos \varphi_2$ drugiego silnika jest większy od $\cos \varphi_1$ silnika pierwszego. Silnik przykładu 45 zdolny jest już przy prądzie $I = 2,5 \text{ A}$ wydać mniej więcej tę samą moc mechaniczną co silnik przykładu 44 przy prądzie $I = 5 \text{ A}$. Co z tego za wniosek?

Otóż prądnicą scharakteryzowana jest dwiema wielkościami: dopuszczalnym prądem obciążenia I i napięciem na zaciskach U . Innymi słowy, jest ona budowana na moc pozorną $U_p = I \cdot U$. Od wielkości tej mocy zależy wielkość prądniczy. Z drugiej strony, moc jaką silnik przetwarza na moc mechaniczną, pomijawszy straty samego silnika wynosi: $N_{rz} = U \cdot I \cdot \cos \varphi$.

Jest to moc rzeczywista, czyli taka, jaką w zasadzie zdolny on jest zamienić na moc mechaniczną.

Zależy ona od indukcyjności uzwojenia silnika czyli od jego $\cos \varphi$. Im jest on większy, tym i moc jest większa. Czerpiąc pełny dopuszczalny prąd źródła, jesteśmy w stanie otrzymać większą i mniejszą pracę

mechaniczną, zależnie od $\cos \varphi$ silnika. Możemy sobie wyobrazić, że prądnicą zawsze wytwarza tę samą moc, równą mocy pozornej $N_p = U \cdot I$,

Silnik zaś zdolny jest zamienić część tej mocy na moc mechaniczną, zależnie od wielkości posiadanego $\cos \varphi$. Jest to moc rzeczywista, równa $N_{rz} = U \cdot I \cdot \cos \varphi$.

Pozostała moc spowodowana istnieniem cosinusa jest właśnie mocą urojoną $N_u = U \cdot I \cdot \sin \varphi$, której silnik nie zamienia na moc mechaniczną, a która cyrkuluje stale między prądnicą i silnikiem. Przy małym $\cos \varphi$ silnika, dla uzyskania tej samej mocy mechanicznej (475 W) płynnie duży prąd w przewodach doprowadzających (5 A), powodując straty na grzanie przewodów. Porównawszy wyniki przykładów 44 i 45 widzimy, że dla silnika z małym i dużym $\cos \varphi$ przy tej samej mocy oddawanej przez oba silniki, jeden z nich pobiera prąd 5 A a drugi 2,5 A. Przy największym dopuszczalnym prądzie obciążenia prądnicą np. 5 A w wypadku pierwszym można załączyć na nią tylko jeden silnik, a w drugim dwa takie same, czyli uzyskać z tej samej prądnicą moc dwa razy większą.

W pierwszym wypadku prądnicą, będąc obciążona największym dopuszczalnym prądem, jest jednak niewykorzystana. Jeśli więc elektrownia ma dużo odbiorców z silnikami o małych $\cos \varphi$, musi stawiać duże, a więc kosztowne prądnice z większym dopuszczalnym prądem obciążenia, przewidyując z góry niewykorzystanie ich mocy rzeczywistych.

A ponieważ odbiorca płaci w zasadzie za moc rzeczywistą, dlatego elektrownia, chcąc wynagrodzić sobie straty spowodowane małym $\cos \varphi$, pobiera pieniądze od właścicieli warsztatów i fabryk, posiadających silniki elektryczne, nie tylko za moc rzeczywistą przetwarzaną na pracę mechaniczną, lecz — według niższej wprawdzie taryfy — także za moc urojoną. Moc ta zostaje odbiorcy przez elektrownię jakby dostarczona, ale nie wykorzystana przez niego powraca do elektrowni.

Przykład 46.

Silnik odkurzacza pobiera przy napięciu $U = 220$ V i częstotliwości $f = 50$ ~/sek prąd o natężeniu $I = 0,8$ A, $\cos \varphi$ silnika wynosi 0,78. Ile kosztuje półgodzinne odkurzanie, jeśli jedna kilowat-godzina kosztuje 20 groszy. Jaką moc pozorną i urojoną pobiera silnik?

Ze wzoru (51) znajdujemy moc rzeczywistą pobieraną przez silnik:

$$N_{rz} = U \cdot I \cdot \cos \varphi = 220 \cdot 0,8 \cdot 0,78 = 137 \text{ W} = 0,137 \text{ kW}$$

Praca, jaką wykona silnik w ciągu pół godziny wynosi:

$$A = N_{rz} \cdot \text{czas} = N_{rz} \cdot t = 0,137 \cdot 0,5 = 0,0685 \text{ KWh}$$

Jedna KWh kosztuje 20 gr stąd 0,0685 KWh będzie kosztować:

$$0,0685 \cdot 20 = 1,37 \cong 1,4 \text{ grosza.}$$

A więc półgodzinne odkurzanie kosztuje około półtora grosza.

Moc pozorna jaką silnik pobiera wynosi (wzór 53):

$$N_p = U \cdot I = 220 \cdot 0,8 = 176 \text{ V A} = 0,176 \text{ kVA}$$

Moc urojoną znajdziemy ze wzoru (54):

$$N_u^2 = N_p^2 - N_{rz}^2; N_u = \sqrt{N_p^2 - N_{rz}^2} = \sqrt{176^2 - 137^2} = 111 \text{ war.}$$

Przykład 47.

Dany jest układ szeregowego połączenia oporu omowego $R = 15 \Omega$, cewki o indukcyjności $L = 0,2 \text{ H}$ i kondensatora o pojemności $C = 30 \mu\text{F}$ załączonych na źródło napięcia zmiennego $U = 220 \text{ V}$. Częstotliwość $f = 50 \text{ } \sim / \text{sek}$ (rys. 158). Jaka jest wielkość prądu I płynącego w obwodzie i jego przesunięcie fazy względem napięcia źródła?

Jak wielkie są spadki napięć U_R , U_L i U_C oraz jak wielkie są moce obwodu: rzeczywista, pozorna i urojona?

Przy jakiej częstotliwości (f) zachodzi rezonans napięć w obwodzie?

Znajdujemy wielkość oporności indukcyjnej i pojemnościowej. Oporność indukcyjna $X_L = \omega L = 2\pi f \cdot L$ wynosi:

$$X_L = 2\pi \cdot 50 \cdot 0,2 = 62,8 \Omega$$

$$\text{Oporność pojemnościowa } X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi \cdot f C}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 30 \cdot 10^{-6}} = 106 \Omega$$

Stąd oporność urojona obwodu $X = \omega L - \frac{1}{\omega C}$ wynosi

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 62,8 - 106 = -43,2 \Omega$$

ze wzoru (50) znajdujemy oporność pozorną obwodu:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{15^2 + (-43,2)^2} = 45,8 \Omega$$

Wielkość prądu i jego przesunięcia fazy znajdujemy ze wzorów (48) i (49):

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{220}{45,8} = 4,8 \text{ A}$$

$$\text{oraz } \text{tg } \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = \frac{-43,2}{15} = -2,9$$

$$\varphi = -71^\circ$$

Spadki napięć wynoszą:

$$\text{Omowy } U_R = I \cdot R = 4,8 \cdot 15 = 72 \text{ V}$$

$$\text{Indukcyjny } U_L = I \cdot \omega L = 4,8 \cdot 62,8 = 300 \text{ V}$$

$$\text{Pojemnościowy } U_C = I \cdot \frac{1}{\omega C} = 4,8 \cdot 106 = 510 \text{ V}$$

Wykres wektorowy tego obwodu podaje rys. 159.

W celu znalezienia mocy obwodu odczytujemy najpierw z tablic trygonometrycznych wielkości funkcji $\cos \varphi$ oraz $\sin \varphi$ dla $\varphi = 71^\circ$.

$$\cos 71^\circ = 0,328$$

$$\sin 71^\circ = 0,940$$

Poszukiwane moce wynoszą:

$$\text{Moc pozorna (53): } U_p = U \cdot I = 220 \cdot 4,8 = 1050 \text{ VA} = 1,05 \text{ kVA.}$$

$$\text{Moc rzeczywista (51): } U_{rz} = U \cdot I \cdot \cos 71^\circ = 220 \cdot 4,8 \cdot 0,328 = 346 \text{ W.}$$

$$\text{Moc urojona (52): } U_u = U \cdot I \cdot \sin 71^\circ = 220 \cdot 4,8 \cdot 0,940 = 985 \text{ War.}$$

Częstotliwość rezonansowa obwodu wynosi:

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{0,2 \cdot 30 \cdot 10^{-6}}} \quad 64 = \sim / \text{sek.}$$

Prąd trójfazowy. W miarę wzrostu spożycia energii skutkiem rozpowszechnienia urządzeń elektrycznych i stosowania coraz większej ilości silników elektrycznych do najróżnorodniejszego rodzaju prac czy to w domu, warsztacie, czy przemyśle, przewody doprowadzające prąd z elektrowni do poszczególnych pomieszczeń skutkiem nagrzewania się powodowały bezpowrotną stratę dużej części energii. Usiłowano temu w jakiś sposób zaradzić. Stwierdzono, że pewien układ trójprądowy prądu zmiennego potrzebuje dla dostarczenia tej samej energii elektrycznej, znacznie mniejszej ilości przewodów tego samego przekroju i zmniejsza straty powstałe przy jej przesyłaniu. Daje to w następstwie korzystniejsze i sprawniejsze wykorzystanie sieci elektrycznej. Tak powstał układ prądu zmiennego zwany trójfazowym; jest on dziś powszechnie używany zarówno do napędu silników, jak ogrzewania czy oświetlania.

Zajmiemy się teraz sposobem wytwarzania prądu trójfazowego i jego szczególnymi własnościami.

Umocujmy trzy cewki na okręgu koła w równych od siebie odstępach (rys. 160).

Jak wiemy koło posiada 360° a więc odstęp między sąsiednimi cewkami wynosi $1/3$ okręgu koła czyli kąt 120° . Wewnątrz koła wiruje elektromagnes ze stałą prędkością kątową ω . Dzięki obrotom elektromagnesu zwoje cewki obejmują coraz to inną liczbę linii sił pola magnetycznego. Mimo więc stałego pola elektromagnesu, zwoje cewki znajdują się dzięki jego wirowaniu w zmiennym polu magnetycznym; powoduje to jak wiemy indukowanie się w nich SEM. W ten sposób w każdej z cewek indukować się będzie SEM, która w momencie, gdy który-

kolwiek z biegunów elektromagnesu znajdzie się pod cewką, osiąga swą maksymalną wartość. Rozpatrzmy przebieg zmian indukowanej siły elektromagnesu. Załóżmy, że pod cewką I przechodzi biegun N elektromagnesu. Powstaje wtedy w cewce maksymalna SEM, powiedzmy dodatnia. W czasie dalszego obrotu elektromagnesu coraz mniej linii przechodzi przez cewkę I, czyli indukowana w niej siła elektromotoryczna maleje, aż w chwili gdy biegun N przekreśli się o ćwierć obrotu, indukowana SEM będzie równa zero. W następnej ćwierci obrotu zbliża się do cewki biegun S, indukuje się w niej coraz większa, tym razem ujemna SEM, która osiąga swe maksimum, gdy biegun S przechodzi pod cewką. Obracając dalej elektromagnes o ćwierć obrotu, otrzymujemy znów SEM równą zero, a po następnej ćwiartce obrotu biegun N znajdzie się z powrotem pod cewką, indukując w niej maksymalną SEM dodatnią. Otrzymujemy w czasie jednego pełnego obrotu magnesu pełny okres zmiany indukowanej siły elektromotorycznej.

Cewki są umocowane na okręgu koła w odstępach 120° — stąd też siły elektromotoryczne indukowane w poszczególnych cewkach będą względem siebie przesunięte w fazie o 120° . Wykres wektorowy trzech sił elektromotorycznych indukowanych w cewkach podaje rys. 161. Jeśli do cewek dołączymy np. żarówki (jak na rys. 160), to prądy płynące przez żarówki będą również przesunięte w fazie względem siebie o 120° (rys. 162). Przy bardzo wolnych obrotach elektromagnesu, a więc przy małej częstotliwości SEM indukowanej, żarówki te będą się kolejno zapalać i gasnąć. Zmiany prądów i_1, i_2, i_3 w czasie w poszczególnych cewkach pokazano na wykresie czasowym rys. 163. Z wykresu tego widać, że dla każdej chwili suma prądów $i_1 + i_2 + i_3$ płynących w poszczególnych cewkach, uwzględniając dodatnie lub ujemne znaki prądów, jak zawsze równa zero. Weźmy dla przykładu chwilę (t_1) oznaczoną na rys. 163 prostą (a). Mamy tam: $i_3 = -0,25$ A, $i_2 = -0,25$ A, $i_1 = 0,50$ A; $i_1 + i_2 + i_3 = -0,25 - 0,25 + 0,50 = 0$.

Tak samo np. w chwili (t_2) z prostej (b) odczytujemy: $i_1 = 0$, $i_2 = 0,434$, $i_3 = -0,434$; $i_1 + i_2 + i_3 = 0 + 0,434 - 0,434 = 0$.

Właściwość tę stwierdzimy również na wykresie wektorowym rys. 161 i 162. Jeśli dodamy do siebie geometrycznie prądy lub napięcia powstałe we wszystkich trzech cewkach, to otrzymamy trójkąt równoboczny (a, b, 0) lub dla napięć (e, f, 0) (linie kreskowane na rys. 162 i 161). Ponieważ geometryczna suma prądów lub napięć tworzy trójkąt, a więc obwód zamknięty, stąd wniosek, że suma ta równa jest 0.

Jak się zaraz okaże, wspomniana właściwość prądu trójfazowego umożliwiła zmniejszenie strat w przewodach doprowadzających.

Mamy prądnicę posiadającą trzy uzwojenia tzw. fazowe, rozmieszczone co 120° . Do tych uzwojeń przyłączamy trzy układy żarówek (rys. 164). Prądy i_1, i_2 i i_3 , płynące w każdym z obwodów poszczególniej fazy, są względem siebie przesunięte o 120° w fazie lub w czasie.

Mamy trzy przewody doprowadzające (a, b, c) i trzy przewody odprowadzające (e, f, d) prąd elektryczny.

Trójfazowy układ gwiazdy. Wyobraźmy sobie, że trzy przewody odprowadzające łączymy w jeden przewód. Wtedy w tym przewodzie płynąć będzie suma prądów i_1, i_2, i_3 , a ponieważ suma ta dla każdego momentu jak widzieliśmy równa się zeru, więc w rzeczywistości prąd przez ten przewód płynąć nie będzie. Przewód ten jest niepotrzebny. Wystarczy połączyć razem trzy końce poszczególnych cewek prądnic i połączyć wspólnie jedne strony wszystkich odbiorników, a otrzymamy przepływ prądu i_1, i_2, i_3 przez żarówki (rys. 165).

Jeśli każda faza jest obciążona takim samym oporem, to w każdej fazie płynie ten sam prąd tzw. fazowy o wartości skutecznej I_f . Niech każda faza posiada napięcie tzw. fazowe o wielkości skutecznej U_f i przesunięcie fazy między napięciem i prądem $\cos \varphi_f$. Wówczas moc każdej fazy wyniesie: $U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi_f$ a zatem moc całkowita dawana przez źródło trójfazowe będzie $N = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi_f$.

Widzimy, że zamiast 6 przewodów dla 3 zwykłych układów prądu zmiennego, prowadzimy tylko trzy przewody, a więc przy zasilaniu odbiorników tą samą mocą zmniejszamy dwukrotnie straty w przewodach doprowadzających.

Jest to połączenie trójfazowe zwane gwiazdą (rys. 166). Punkt środkowy gwiazdy oznaczony na rys. 166 literą (O) zwiemy punktem zerowym.

Uzwojenia poszczególnych faz przedstawiają na rys. 166 linie zygzakowate OX, OY, OZ.

W układzie gwiazdy rys. 165, prąd płynący przez każdy przewód tzw. przewodowy I_p jest równy prądowi płynącemu przez każdą z faz $I_p = I_f$. Napięcie fazowe jest to napięcie występujące na końcach każdej z faz, a więc między pkt. OX, OY lub OZ. Między przewodami istnieje jednak większe napięcie, zwane napięciem międzyprzewodowym U_p , będące sumą geometryczną dwóch napięć fazowych np. OX i OZ. Wynosi ono $U_p = \sqrt{3} U_f$ co łatwo znaleźć z trójkąta równoramiennego O, X, Z, rys. 167.

$$U_p = U_f \cdot 2 \sin 60^\circ = U_f \cdot 2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} U_f$$

Moc w układzie gwiazdy wynosi więc:

$$N = 3 U_f I_f \cos \varphi_f = \sqrt{3} U_p \cdot I_p \cdot \cos \varphi_f \quad . \quad . \quad . \quad (55)$$

gdzie U_p — napięcie międzyprzewodowe ($U_p = \sqrt{3} U_f$)

I_p — prąd przewodowy równy prądowi fazowemu $I_p = I_f$.

$\cos \varphi_f$ — cosinus przesunięcia fazy między napięciem i prądem fazowym.

Trójfazowy układ trójkąta. Drugim układem zasadniczym prądu trójfazowego jest układ trójkąta. Uzwojenia poszczególnych faz połączone są w tym układzie ze sobą w szereg, a z punktów połączeniowych wychodzą przewody odprowadzające (rys. 168). W układzie tym napięcie fazowe U_f równe jest napięciu międzyprzewodowemu U_p , natomiast prąd płynący w przewodzie I_p będzie sumą geometryczną prądów płyną-

cych w dwóch sąsiednich fazach. $I_p = \sqrt{3} I_f$. Moc dla układu trójkąta jest taka sama jak dla gwiazdy i wynosi.

$$N = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} U_p \cdot I_p \cdot \cos \varphi_f$$

gdzie U_p — napięcie międzyprzewodowe ($U_p = U_f$)

I_p — prąd przewodowy ($I_p = \sqrt{3} I_f$)

$\cos \varphi_f$ — cosinus przesunięcia fazy między prądem i napięciem fazowym.

Silniki elektryczne trójfazowe buduje się podobnie jak prądnice, które mają trzy uzwojenia połączone ze sobą w gwiazdę lub trójkąt. Końce uzwojeń wprowadzone są do trzech zacisków wejściowych silnika, do których dołączamy przewody doprowadzające prąd z elektrowni.

Wszystkie te zależności słuszne są dla tzw. symetrycznego obciążenia faz, tzn. gdy na każdą z faz dołączony jest ten sam opór. W wypadku jeśli tego nie spełnimy, powstaje szkodliwa niesymetria układu, z powodu której suma geometryczna prądów trzech faz nie równa się zeru powoduje to przepływ prądu powrotnego, obciążającego dodatkowo przewody i fazy. Ma to np. miejsce, gdy układ trójfazowy stosujemy do oświetlenia mieszkań.

Wtedy nie zawsze w każdej fazie jest ta sama ilość zapalonych żarówek. Powstaje niesymetria, na którą szczególnie czuły jest układ gwiazdy (rys. 169). Aby temu zaradzić, łączymy oba punkty zerowe gwiazdy źródła i odbiornika przewodem (linia kreskowana na rys. 169). Otrzymujemy tzw. układ gwiazdy z przewodem zerowym, bardzo często stosowanym w sieciach oświetleniowych domów mieszkalnych. Spowodowany niesymetrycznym obciążeniem nadmierny prąd w jednej z faz powraca wówczas przewodem zerowym do źródła, nie obciążając innych faz. Napięcie między każdą z faz a przewodem zerowym jest wówczas równe napięciu fazowemu.

W elektrycznej instalacji mieszkaniowej najczęściej stosowany jest układ gwiazdowy z przewodem zerowym o napięciu fazowym $U_f = 220 \text{ V}$ i napięciu międzyprzewodowym $U_p = \sqrt{3} \cdot 220 = 380 \text{ V}$.

Żarówki oświetleniowe są wówczas łączone na napięcie 220 V pomiędzy fazę a przewód zerowy, zaś większe silniki elektryczne oraz grzejniki większej mocy posiadają układ gwiazdy lub trójkąta i są załączane na napięcie międzyprzewodowe 380 V (rys. 170).

ROZDZIAŁ IX

STRATY W ŻELAZIE

Histereza. W rozdz. V traktującym o magnetyźmie stwierdziliśmy, że gdy magnesujemy żelazo prądem stałym, to wzrost indukcji magnetycznej B nie jest proporcjonalny do przyrostu prądu elektrycznego. Żelazo magnesuje się według pewnej krzywej zwanej krzywą magnesowania. Zwiększając natężenie prądu elektrycznego od zera do pewnej wartości, otrzymaliśmy wzrost strumienia magnetycznego również od zera do pewnej wartości, odpowiadającej maksymalnej wartości prądu. Mówimy, że namagnesowaliśmy żelazo.

Jak jednak przebiegać będzie proces magnesowania żelaza, jeśli będziemy zmieniać w sposób ciągły natężenie i kierunek prądu, czyli jeśli żelazo przemagnesowujemy?

W tym celu dokonajmy następującego pomiaru. Na rdzeń żelazny nawińmy pewną ilość zwojów i przepuścimy przez nie prąd stały, którego natężenie i kierunek zmienia się w sposób ciągły. Zmierzymy dla każdej wartości prądu odpowiadającą mu indukcję magnetyczną B i wykreślimy zmianę tej indukcji w zależności od zmian natężenia prądu.

Przy wzroście prądu od zera do pewnej obranej największej wartości otrzymamy wtedy wzrost indukcji B według znanej już nam krzywej magnesowania (krzywa O-P rys. 171). Punkt P będzie odpowiadał największemu natężeniu prądu i największej indukcji B . Zmniejszmy teraz natężenie prądu. Indukcja znacznie wówczas maleje, lecz wolniej niż wzrastała przy wzroście prądu. Powrót nie odbywa się po krzywej magnesowania (O-P) lecz po nowej krzywej (P-B). W punkcie B prąd magnesujący osiąga z powrotem wartość O , podczas gdy indukcja w żelazie posiada jeszcze wartość (O-B). Wartość indukcji (O-B) jest to tzw. magnetyzm szczątkowy, który pozostaje w żelazie mimo, że zniknął już prąd magnesujący. Zmienmy teraz kierunek prądu i znów zwiększmy jego natężenie, aż do pewnej ujemnej wartości maksymalnej, równej jego poprzedniej maksymalnej wartości dodatniej. Indukcja B zrazu maleje aż do O , — żelazo rozmagnesowuje się zupełnie (A) — a następnie zmienia znak, staje się ujemna i rośnie do swej maksymalnej wartości, odpowiadającej maksymalnemu prądowi dla punktu P' . Żelazo magnesuje się w odwrotnym kierunku. Zmniejszając teraz natężenie prądu, rozmagnesowujemy ponownie żelazo według krzywej P', B', A' . Dla punktu B' mamy znów wartość prądu równą zeru, a wartość indukcji równą odcinkowi $C-B'$. Jest to znów magnetyzm szczątkowy. Zmieniamy ponownie kierunek prądu i zwiększamy jego natężenie. Indukcja maleje do zera (pkt. A') a następnie zmienia znak i wzrasta wraz z prądem, aż osiąga przy maksy-

małym prądzie dodatnim znów punkt P. Przy przemagnesowywaniu żelaza otrzymujemy krzywą zamkniętą (P-B-A-P'-B'-A'-P) zwaną pętlą histerezy. Zjawisko przemagnesowywania żelaza zachodzi w wypadku magnesowania go prądem zmiennym, który jak wiemy zmienia stale swe natężenie i kierunek. Jeśli maksymalne natężenie prądu będzie mniejsze, to i pętla histerezy będzie mniejsza, zachowując jednak ten sam kształt (krzywa kreskowana na rys. 171). Kształt bowiem pętli histerezy zależy tylko od gatunku żelaza, zawartych w nim domieszek i jego obróbki cieplnej.

Dla żelaza miękkiego otrzymujemy pętlę histerezy bardzo wąską, z małym magnetyzmem szczątkowym (rys. 172). Taką krzywą histerezy posiadają blachy żelazne używane do budowy maszyn i transformatorów elektrycznych. Stal posiada szeroką pętlę histerezy z bardzo dużym magnetyzmem szczątkowym (rys. 173).

Jakie znaczenie ma pętla histerezy? W czasie magnesowania i rozmagnesowania, cząsteczki żelaza układając się (rys. 71) stawiają pewien opór, na którego przezwyciężenie musimy zużyć pewną pracę. Praca ta przy wzajemnym tarcu się cząsteczek żelaza zamienia się na ciepło. W czasie przemagnesowywania żelazo grzeje się. Gdyby nie było pętli histerezy, przemagnesowywanie żelaza postępowałoby według krzywej magnesowania O-P. Nie wkładalibyśmy wtedy dodatkowej pracy, a istniałaby jedynie przemiana energii elektrycznej na magnetyczną, bez strat na ciepło w żelazie. Tak jednak nie jest, gdyż przemagnesowując żelazo tracimy pewną część energii elektrycznej, która zamieniając się na ciepło grzeje żelazo. Te straty energii na ciepło zwiemy stratami histerezy. Im szersza jest pętla histerezy, tym są one większe.

Wszędzie więc tam, gdzie zmuszeni jesteśmy żelazo przemagnesować, staramy się stosować takie jego gatunki, w których pętla histerezy jest jak najwęższa.

Straty na histerezę zależą od rodzaju żelaza, od maksymalnej indukcji B do jakiej żelazo magnesujemy oraz od szybkości przemagnesowywania, a więc od częstotliwości prądu magnesującego.

Znaleziony drogą doświadczalną wzór na straty histerezy w żelazie posiada postać:

$$N_H = \frac{k_H \cdot f}{100} \left(\frac{B_{\max}}{10000} \right)^2 \cdot G \dots \dots (56)$$

gdzie: N_H — straty na histerezę w watach

B_{\max} — maksymalna indukcja w gaussach

f — częstotliwość przemagnesowywania

k_H — współczynnik histerezy, zależny od rodzaju żelaza:

dla blach zwykłych $k_H = 4,4 - 4,7$

dla blach o znacznej zawartości krzemu $k_H = 2,4 - 3$

dla blach o grubości 0,35 mm wartości są mniejsze,

dla blach o grubości 0,5 mm „ „ większe,

G — ciężar żelaza w kilogramach.

Prądy wirowe. Na podstawie opisanego w rozdz. VII zjawiska indukcji wiemy, że w przewodzie przecinającym linie pola magnetycznego lub w pętli znajdującej się w zmiennym polu magnetycznym indukuje się siła elektromotoryczna. Otóż okazuje się, że siła elektromotoryczna indukuje się nie tylko w przewodzie elektrycznym, lecz w każdej bryle materiału przewodzącego jak miedź, żelazo lub aluminium, jeśli znajduje się pod wpływem zmiennego pola magnetycznego lub przecina przy swym ruchu linie sił stałego pola magnetycznego. Pod działaniem tej SEM powstają prądy, które nie mając ściśle określonej drogi (jak to jest w przewodzie), płyną po różnych liniach zamkniętych wirowych, wybierając te miejsca bryły, które stawiają im najmniejszy opór. Prądy te zwiemy prądami wirowymi. Powodują one grzanie się metalu, a tym samym zużywają pewną część energii pola magnetycznego, i są przez to dla nas źródłem strat.

Możemy je bardzo łatwo wykryć drogą doświadczalną. Umieścimy w polu elektromagnesu tarczę aluminiową mogącą się obracać wokół osi przechodzącej przez jej środek (rys. 174). Gdy przez uzwojenie elektromagnesu (A) nie płynie prąd elektryczny, nie mamy pola magnetycznego, zaś popchnięta tarcza (B) kręci się z łatwością wokół swej osi (O). Z chwilą gdy włączymy prąd elektryczny, powstanie pole magnetyczne, które wznici w obracającej się tarczy prądy wirowe. Kierunek powstałych prądów wirowych możemy wyznaczyć na zasadzie reguły prawej ręki.

Tak jak w prądnicę, dla otrzymania energii elektrycznej musimy włożyć pracę mechaniczną, tak i tu, obracająca się poprzednio swobodnie tarcza w chwili załączenia prądu na elektromagnes zostanie od razu zahamowana i aby się nadal mogła kręcić, musi być stale popychana. Obracając tarczę hamowaną wzajemnym oddziaływaniem pola magnetycznego i prądów wirowych wykonujemy pracę, która za pośrednictwem tychże prądów wirowych zamienia się na ciepło. Tarcza grzeje się. Chcąc zmniejszyć straty powstałe od prądów wirowych, musimy zwiększyć oporność metalu, znajdującego się pod wpływem zmiennego pola magnetycznego. W celu zwiększenia oporności żelaza, dodajemy mu krzem (1 — 4% Si). Otrzymane w ten sposób żelazo krzemowe posiada oporność właściwą, dochodzącą do wartości 5-krotnie większej od oporności żelaza zwykłego.

Drugim sposobem jest odpowiednie podzielenie żelaza warstwami izolacyjnymi hamującymi przepływ prądów wirowych. W tarczy z rys. 174 prądy wirowe płyną w warstwach prostopadłych do osi tarczy, a więc prostopadle do linii pola magnetycznego. Gdybyśmy wykonali tarczę nie z pełnego aluminium lecz z blaszek uluminiowych izolowanych od siebie i ułożonych równolegle do linii pola (rys. 175), zatarasowalibyśmy drogę dla prądów wirowych warstwami izolacyjnymi. Przez zwiększenie tą drogą oporów, które prądy wirowe muszą pokonywać, zmniejszamy tym samym straty.

Dlatego w celu zmniejszenia strat na prądy wirowe, części maszyn elektrycznych wirujące w stałym polu magnetycznym i rdzenie transformatorów, które przecież zawsze znajdują się w zmiennym polu magne-

tycznym, wykonujemy z izolowanych od siebie blach żelaznych. Grubości stosowanych blach wynoszą 0,35, 0,5, 0,7, 1,0, 1,5 mm. Izolujemy je między sobą cienkim papierem lub pokrywamy lakierem izolacyjnym; dla małych wartości indukcji B już wystarczy utlenić blachy. W ten sposób powstała na powierzchni blach cienka warstwa tlenku żelaza izoluje je dostatecznie od siebie.

Straty na prądy wirowe określamy wzorem:

$$N_w = K_w \cdot \left(\frac{f \cdot B_{\max}}{100 \cdot 10000} \right)^2 \cdot \dots \cdot \quad (57)$$

gdzie: N_w — straty na prądy wirowe w watach

B_{\max} — maksymalna indukcja w gaussach

f — częstotliwość prądu

G — ciężar żelaza w kilogramach

k_w — współczynnik materiału

Dla zwykłej blachy $k_w = 3,2 - 5,7$

Dla silnie nakrzemionej blachy $k_w = 0,6 - 1,2$

Małe liczby odnoszą się do blach o grubości 0,35 mm, ^owiększe do blach o grubości 0,5 mm.

Zjawisko prądów wirowych w częściach żelaznych, miedzianych lub aluminiowych wykorzystano między innymi do budowy liczników energii elektrycznej prądu zmiennego oraz małych motorków gramofonowych. Ponieważ oba te urządzenia są prawie identycznie zbudowane i pracują na tej samej zasadzie, zajmiemy się tylko opisem licznika.

Całkowite straty w żelazie. Jak wiemy straty w żelazie spowodowane są zjawiskiem histerezy i prądami wirowymi. Straty na histerezę i prądy wirowe oblicza się przy pomocy poprzednio podanych wzorów. Całkowite straty w żelazie będą równe sumie obydwu tych strat:

$$N_z^* = N_w + N_H$$

Straty całkowite możemy również obliczyć, wyznaczając drogą dość wiadczalną straty w żelazie dla jednego kg danego metalu. Tablica VI przedstawia straty całkowite w żelazie dla blach o grubości 0,35 mm i 0,5 mm przy różnej zawartości krzemu i różnych indukcjach B. Odczytujemy z niej dla danego rodzaju blachy i dla danej maksymalnej indukcji B_{\max} całkowite straty występujące w jednym kilogramie materiału. Pomnożywszy je następnie przez ciężar użytego żelaza, otrzymamy całkowite straty w urządzeniu.

Przykład 48.

Rdzeń elektromagnesu zrobiony jest ze zwykłej blachy o grubości 0,5 mm. Ciężar rdzenia wynosi 10 kg. Jak wielkie są straty na histerezę, prądy wirowe i całkowite straty dla częstotliwości $f = 50 \sim/\text{sek}$ i maksymalnej indukcji $B_{\max} = 15000$ gaussów?

1. Straty na histerezę:

$K_H = 4,7$ dla blachy o grubości 0,5 mm

$$N_H = \frac{K_H \cdot f}{100} \left(\frac{B_{\max}}{10000} \right)^2 \cdot G =$$

$$= \frac{4,7 \cdot 50}{100} \cdot \left(\frac{15000}{10000} \right)^2 \cdot 10 = 52,92 \text{ W}$$

2. Straty na prądy wirowe:

$K_w = 5,7$ dla blachy o grubości 0,5 mm

$$N_w = k_w \cdot \left(\frac{f \cdot B_{\max}}{100 \cdot 10000} \right)^2 \cdot G =$$

$$= 5,7 \cdot \left(\frac{50 \cdot 15000}{100 \cdot 10000} \right)^2 \cdot 10 = 32,0 \text{ W}$$

3. Straty całkowite:

$$N_z = N_H + N_w = 52,92 + 32 = 84,92 \text{ W}$$

Straty dla jednego kilograma blachy wynoszą zatem 8,49 W.

Z tablicy VI znajdujemy dla tych warunków określone drogą doświadczalną straty dla jednego kilograma 8,7 W.

Widzimy, że straty znalezione drogą obliczeniową są prawie równe stratom znalezionym drogą doświadczalną.

Zasada indukcyjnego licznika energii elektrycznej prądu zmiennego. Na osi a-b (rys. 176) jest umocowana tarcza aluminiowa, mogąca się swobodnie obracać. Tarcza ta znajduje się w polu dwu elektromagnesów zasilanych prądem zmiennym. Pod wpływem strumienia elektromagnesu I powstają w tarczy prądy wirowe, które, działając na strumień elektromagnesu II, nadają jej moment obrotowy. Podobnie prądy wirowe indukowane w tarczy przez strumień elektromagnesu II wraz ze strumieniem elektromagnesu I dają również moment obrotowy (o zasadzie powstawania momentu obrotowego przy wzajemnym oddziaływaniu strumienia magnetycznego i prądu w przewodzie zob. rozdz. V). Tarcza kręci się. Sumaryczny moment wynosi:

$$K = k \cdot \Phi_I \cdot \Phi_{II} \cdot \sin \beta$$

Jest on proporcjonalny do obu strumieni i do kąta β przesunięcia fazowego między nimi. Przy stałych wielkościach Φ_I i Φ_{II} moment będzie największy, gdy $\sin \beta$ równa się jedności, a więc $\beta = 90^\circ$. Osiągamy to, regulując oporem (R) prąd w zwojach zwartych umieszczonych na rdzeniu elektromagnesu I (rys. 176).

Chcąc pomierzyć energię (rys. 177) pobieraną przez odbiornik (A), włączamy jeden elektromagnes w szereg z odbiornikiem, drugi na jego

zaciski (d, c). Wtedy strumień pierwszego elektromagnesu będzie proporcjonalny do prądu płynącego przez odbiornik (A) (strumień prądowy), podczas gdy strumień drugiego elektromagnesu będzie proporcjonalny do napięcia na zaciskach (c, d) odbiornika (strumień napięciowy). Odbiornik pobiera największą moc, gdy nie ma przesunięcia fazy między napięciem i prądem, a więc $\varphi = 0$ czyli $\cos \varphi = 1$. Winno to odpowiadać największemu momentowi obrotowemu tarczy licznika, czyli $\sin \beta = 1$, a stąd $\sin \beta = \cos \varphi$.

Moment obrotowy tarczy licznika wynosi zatem:

$$M = k' \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Tarcza licznika obraca się więc z prędkością proporcjonalną do mocy pobieranej przez odbiornik. Ilość obrotów tarczy w pewnym czasie określa energię elektryczną zużytą przez odbiornik.

$$\text{Ilość obrotów} = \text{moc} \cdot \text{czas} = \text{praca}$$

Ilość obrotów jest rejestrowana za pomocą układu kółek zębatach przez liczydło, wykazujące w okienku licznika zużytą energię elektryczną w KWh.

ROZDZIAŁ X

TRANSFORMATORY

Moc pozorną, którą daje źródło energii elektrycznej, wyraża się iloczynem napięcia i prądu: $I \cdot U$.

Możemy więc otrzymywać tę samą moc przy różnych wartościach napięć i prądów, jeżeli iloczyn ich jest stały np.:

100 V	pomnożone przez	200 A
1000 V	„	20 A
10000 V	„	2 A

We wszystkich tych trzech wypadkach otrzymujemy tę samą moc równą:

$$2 \cdot 10000 = 20 \cdot 1000 = 200 \cdot 100 = 20000 \text{ VA}$$

Przesyłając duże ilości energii elektrycznej na dalsze odległości, korzystnie jest pracować przy małych prądach a dużych napięciach. Straty w przewodach zależą od wielkości prądu ($I^2 \cdot R$), przesyłając więc daną moc przy wyższym napięciu, otrzymujemy mniejsze prądy a więc mniejsze straty i możemy wówczas stosować mniejsze przekroje przewodów przesyłowych.

Dziś linie przesyłowe energii elektrycznej zasilane są napięciem dochodzącym do wartości 300000 V. Aby odebrać tę energię elektryczną, musimy jednak zastosować jakieś urządzenie, któreby zmniejszyło napięcie a zwiększyło prąd. Niepodobna bowiem wyobrazić sobie użycia napięcia 300000 V np. do oświetlenia mieszkania. Pomijając już niebezpieczeństwo życia ludzkiego, to przy tak znacznych napięciach, ze względu na możliwość przeskoku iskry elektrycznej, niezbędne jest stosowanie dużych izolatorów i dużych odstępów między przewodami, które prowadzą prąd. Każdy z nas widział zapewne izolatory linii przesyłowej wysokiego napięcia. Są one duże i ciężkie. Prowadzenie przewodów oświetleniowych w mieszkaniach na takich izolatorach byłoby trudne, kosztowne i zajmowałoby dużo miejsca. Pozatem nie buduje się ani żarówek ani silników na napięcie 300 KV. Dlatego też sieć oświetleniowa mieszkań jest budowana na napięcie 220 V i do tego napięcia musimy obniżyć napięcie np. 300000 V otrzymywane z linii przesyłowej.

Również i maszyny elektryczne wytwarzające prąd i napięcie nie mogą pracować przy tak znacznych napięciach. Możemy zbudować prądnice na napięcie np. 15000 V, ale na napięcie 300000 V jest wprost niemożliwe, ze względu na duże napięcie występujące między poszczególnymi prętami uzwojenia prądnicy. Trzeba by było pręty bardzo dobrze izolować od siebie, co byłoby trudne i kosztowne.

Dlatego budujemy urządzenia, które przemieniają, transformują dane napięcie na wyższe lub niższe, nazywamy je transformatorami. Rys. 178 przedstawia typowe zastosowanie transformatorów. Elektrownia (A) zasila sieć kolei elektrycznej. Prądnicie elektrowni pracują przy napięciu 15000 V. Zasilanie tym napięciem w jednym tylko miejscu szyn i przewodów kolei elektrycznej powodowałoby duże spadki napięć, tak że lokomotywa zbyt oddalona od punktu zasilania nie otrzymałaby dostatecznego napięcia. W tym celu w elektrowni transformujemy za pomocą transformatora T_1 napięcie 15000 V na 60000 V. Przy pomocy linii przesyłowej (B) dostarczamy je do różnych punktów sieci kolejowej, gdzie za pośrednictwem transformatorów T_2 redukujemy to napięcie spowrotem do 15000 V. W samej lokomotywie (C) silniki elektryczne pracują na napięcie 500 V. To też napięcie 15000 V pomiędzy przewodem jednym a szynami, pobierane przy pomocy ślizgaczy i kół, dochodzi do transformatora T_3 . Tutaj transformuje się ono na napięcie 500 V, które już bezpośrednio zasila silniki lokomotywy.

Zasada transformatorów. Transformator składa się z rdzenia wykonanego z izolowanych od siebie blach żelaznych, na którym nawinięte są dwa uzwojenia. Jedno z nich, tzw. pierwotne, dołącza się do źródła prądu zmiennego, a drugie, zwane wtórnym, do odbiornika energii elektrycznej (żarówka, silnik) lub do linii przesyłowej.

Zasadniczy sposób działania transformatora poznaliśmy w rozdz. VII (rys. 116).

Wiemy, że jeżeli w rdzeniu transformatora będzie płynąć zmienny strumień magnetyczny, wywoła on powstanie w obu uzwojeniach sił elektromotorycznych E_1 i E_2 . Przyjmijmy, że uzwojenie wtórne jest rozwarłte czyli nie załączamy na nie żadnego odbiornika energii elektrycznej. Wtedy strumień magnetyczny, płynący w rdzeniu, spowodowany jest przepływem prądu I_1 w uzwojeniu pierwotnym. Jest to tzw. bieg luzem (jałowy) transformatora.

Jeśli do strony wtórnej przyłączymy jakiś odbiornik (R) np. żarówkę, silnik lub obciążoną linię przesyłową, to w uzwojeniu wtórnym popłynie prąd I_2 . Prąd ten wywoła własny strumień magnetyczny, przeciwdziałający strumieniowi pierwotnemu, wytworzonymu przez prąd I_1 strony pierwotnej. W rezultacie w rdzeniu transformatora płynie wtedy pewien sumaryczny strumień przenikający oba uzwojenia i wytwarzający w nich siły elektromotoryczne indukowane E_1 i E_2 . Każdy jednak z prądów płynących w poszczególnym uzwojeniu wywołuje również pewien strumień zwany strumieniem rozproszenia Φ_r , obejmujący tylko przynależne mu uzwojenie. A więc prąd pierwotny I_1 wytwarza wokół uzwojenia pierwotnego strumień rozproszenia Φ_{r1} , a podobnie prąd wtórny I_2 wokół uzwojenia wtórnego strumień rozproszenia Φ_{r2} (rys. 179).

Strumienie rozproszenia każdego z uzwojeń zamykają się przez powietrze i nie przenikają przez zwoje uzwojenia drugiego. Nie biorą więc one udziału w oddziaływaniu wzajemnym na siebie prądu i napięć strony pierwotnej i wtórnej; powodują one jedynie występowanie oporu indukcyjnego w każdym z uzwojeń.

W transformatorze rozróżniamy więc trzy strumienie:

1. Strumień główny Φ przenikający przez oba uzwojenia transformatora a będący tym czynnikiem, dzięki któremu każda zmiana czy to w natężeniu prądu czy też wielkości napięcia panującego na jednym z uzwojeń powoduje analogiczną zmianę prądu i napięcia w uzwojeniu drugim.

Jest to strumień użyteczny, umożliwiający nam transformowanie danego napięcia na inne, korzystniejsze w użyciu. Strumień ten indukuje siły elektromotoryczne E_1 i E_2 .

2. Strumień rozproszenia Φ_{r_1} strony pierwotnej, wywołujący opór indukcyjny strony pierwotnej.

3. Strumień rozproszenia Φ_{r_2} strony wtórnej, wywołujący opór indukcyjny strony wtórnej.

Strumienie rozproszenia staramy się uczynić stosunkowo małymi, aby zapewnić sprawną i korzystną pracę transformatora. Są one w zasadzie dla nas szkodliwe, mają one jednak tę dodatnią cechę, że będąc przyczyną występowania oporu indukcyjnego, ograniczają wielkość prądu zwarcia transformatora. Strumień główny jest mniej więcej stały, malejącą nieznacznie w miarę obciążania transformatora.

Rozpatrzmy teraz prądy i spadki napięć występujące po obu stronach transformatora. Pod wpływem strumienia Φ powstają SEM indukowane w obu uzwojeniach E_1 i E_2 określone wzorami:

$$E_1 = 4,44 \cdot \Phi \cdot f \cdot Z_1 \cdot 10^{-8} \text{ volt}$$

$$E_2 = 4,44 \cdot \Phi \cdot f \cdot Z_2 \cdot 10^{-8} \text{ volt}$$

gdzie: Φ — strumień główny w gaussach

f — częstotliwość prądu w \sim /sek

Z_1 — liczba zwojów uzwojenia pierwotnego

Z_2 — liczba zwojów uzwojenia wtórnego

a stosunek ich wynosi:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{Z_1}{Z_2}$$

SEM indukowana E_1 w uzwojeniu pierwotnym przeciwdziała napięciu przyłożonemu U_1 . Prócz tego prąd I_1 płynący przez to uzwojenie wywołuje na nim spadek napięcia omowy $U_{R1} = I_1 \cdot R_1$ oraz indukcyjny $U_{L1} = I_1 \cdot \omega L_1$; gdzie R_1 jest opornością omową, a L_1 indukcyjnością rozproszenia strony pierwotnej transformatora.

Oba te spadki napięć wraz z siłą elektromotoryczną indukowaną E_1 dodane geometrycznie są równe napięciu przyłożonemu U_1 .

Po stronie wtórnej mamy SEM indukowaną E_2 . Prąd wtórny I_2 płynący po tej stronie wywołuje również spadek napięcia omowy $U_{R2} = I_2 \cdot R_2$ oraz indukcyjny $U_{L2} = I_2 \cdot \omega L_2$ na uzwojeniu strony wtórnej (R_2 — oporność omowa strony wtórnej, L_2 — indukcyjność rozproszenia strony wtórnej).

Różnica geometryczna SEM (E_2) oraz spadków napięć U_{R2} i U_{L2} daje napięcie wtórne U_2 istniejące na zaciskach transformatora.

Bieg jałowy transformatora. Jeśli uzwojenie wtórne jest rozwarte, to prąd I_1 jest bardzo mały. Wytwarza on wówczas tylko strumień Φ i pokrywa straty w żelazie. Spadki napięć: omowy i indukcyjny są więc bardzo małe i możemy wtedy przyjąć:

$$U_1 = E_1 \quad \text{oraz} \quad U_2 = E_2$$

$$\text{a ponieważ } \frac{E_1}{E_2} = \frac{Z_1}{Z_2} \quad \text{więc} \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{Z_1}{Z_2} = p \dots \dots (58)$$

Przekładnia transformatora. Wielkość (p) zwiemy przekładnią transformatora. Napięcia po obu stronach transformatora przy biegu jałowym mają się tak do siebie, jak ilości zwojów obu uzwojeń.

Transformator obciążony. Jeśli do wtórnego uzwojenia dołączymy opór R , popłynie w nim wówczas prąd I_2 (część kreskowana rys. 179). Prąd I_2 wytworzy własny zmienny strumień magnetyczny, przeciwdziałający strumieniowi pierwotnemu powstałemu od prądu I_1 . Strumień sumaryczny płynący przez rdzeń transformatora będzie nieco mniejszy, a tym samym SEM w uzwojeniu pierwotnym

$$(E_1 = 4,44 \cdot \Phi \cdot f \cdot Z_1 \cdot 10^{-8} \text{ V})$$

trochę zmaleje. Jednak suma geometryczna SEM (E_1) i spadków napięć: omowego i indukcyjnego musi zawsze równać się napięciu zasilającemu U_1 . Napięcie to jest stałe, więc przy zmaleniu E_1 muszą wzrosnąć spadki napięć, czyli wzrośnie prąd I_1 . Po wtórnej stronie transformatora na jego uzwojeniu powstają również spadki napięć: indukcyjny i omowy, to też napięcie U_2 na oporze R będzie mniejsze od SEM wtórnej (E_2).

Przy wzroście I_2 po stronie wtórnej transformatora skutkiem jego większego obciążenia wzrastać będzie również prąd I_1 po jego stronie pierwotnej, przy jednoczesnym maleniu sił elektromotorycznych E_1 i E_2 . Zmalać zatem i napięcie strony wtórnej U_2 . Ale ponieważ spadki napięć po obu stronach transformatora staramy się uczynić zawsze małe, więc i teraz można z pewnym przybliżeniem przyjąć:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{Z_1}{Z_2}$$

Z drugiej strony, pomijając straty wewnętrzne transformatora, energia doprowadzona po stronie pierwotnej winna równać się energii otrzymanej po stronie wtórnej, a więc:

$$I_1 \cdot U_1 = I_2 \cdot U_2$$

$$\text{a przyjmując } \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{Z_1}{Z_2} \quad \text{otrzymamy stosunek prądu: } \frac{I_1}{I_2} \approx \frac{Z_2}{Z_1}$$

W transformatorze w uzwojeniu, które posiada dużo zwojów, płynie mały prąd, a napięcie na zaciskach transformatora jest duże. Odwrotnie, po stronie gdzie ilość zwojów jest mniejsza, płynie prąd większy, a napięcie mamy mniejsze.

$$\begin{array}{ll} \text{Weźmy dla przykładu} & U_1 = 220 \text{ V} & Z_1 = 1000 \\ & I_1 = 10 \text{ A} & Z_2 = 2000 \end{array}$$

po str. wtórnej otrzymamy:

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{Z_2}{Z_1} = 220 \cdot \frac{2000}{1000} = 440 \text{ V}$$

$$I_2 = I_1 \cdot \frac{Z_1}{Z_2} = 10 \cdot \frac{1000}{2000} = 5 \text{ A}$$

Jeśli po stronie wtórnej będzie tylko 500 zwojów ($Z_2 = 500$), to otrzymamy:

$$U_2 = 220 \cdot \frac{500}{1000} = 110 \text{ V}; \quad I_2 = 10 \cdot \frac{1000}{500} = 20 \text{ A}$$

Straty w transformatorze. W rzeczywistości posiadamy po stronie wtórnej napięcie U_2 trochę mniejsze niż wynikające ze wzoru

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{Z_2}{Z_1}$$

a prąd po stronie pierwotnej I_1 większy niż znaleziony ze wzoru

$$I_1 = I_2 \cdot \frac{Z_2}{Z_1}$$

Stąd też energia doprowadzona do transformatora jest większa od energii z niego czerpanej. Różnica ta idzie na pokrycie strat wewnętrznych transformatora (z powodu ciągłego przemagnesowywania, zob. rozdz. IX) i w obu jego uzwojeniach.

Straty w żelazie są mniej więcej stałe, gdyż strumień magnetyczny transformatora jest prawie stały, w rzeczywistości malejący nieco z obciążeniem.

Straty w uzwojeniach, zwane stratami w miedzi, pochodzą od przepływu prądów przez uzwojenia, posiadające przecież pewien opór omowy. Rosną one wraz z prądem.

Dopuszczalny prąd obciążenia. Oba rodzaje strat powodują, że transformator podczas pracy grzeje się. Z tego powodu nie możemy do transformatora dołączyć dowolnego napięcia i czerpać dowolnego prądu. Moglibyśmy zbyt dużym prądem spowodować nadmierny wzrost temperatury transformatora, zwęglenie izolacji przewodów uzwojonych, a więc jego zniszczenie. Ze względu na straty w miedzi dopuszczalny jest pewien maksymalny prąd strony wtórnej I_2 a tym samym i maksymalny prąd strony pierwotnej I_1 .

Dopuszczalne napięcie strony pierwotnej. Straty w żelazie rosną wraz z wzrostem strumienia. Dopuszczalny jest pewien określony maksymalny strumień magnetyczny Φ , płynący przez żelazo. Patrząc

na wzór na indukowaną siłę elektromotoryczną $E_1 = 4,44 \Phi \cdot f \cdot Z_1 \cdot 10^{-8} V$ widzimy, że strumień zależy od wielkości SEM, a ponieważ $E_1 = U_1$, więc od napięcia przyłożonego U_1 . Stąd też otrzymamy największe napięcie dopuszczalne, jakie możemy załączyć do strony pierwotnej transformatora. Innymi słowami wielkość transformatora zależy od prądu i od napięcia pierwotnego, a więc od iloczynu $U_1 \cdot I_1$, będącego niczym innym, jak mocą pozorną N_p . Na tabliczkach transformatora mamy zawsze podaną jego maksymalną moc pozorną w VA lub KVA oraz napięcia strony pierwotnej i wtórnej.

N_p : 120/KVA
moc pozorna

1000/220 V
nap. pier./nap. wtórne

Sprawność transformatora. Straty występujące w transformatorach są stosunkowo małe; wynoszą 1—10% mocy doprowadzonej. To też transformator jest urządzeniem o dużej sprawności. Dla transformatora rzędu 1 KVA sprawność wynosi $\eta = 91\%$. Dla dużych mocy rzędu 100 KVA i więcej sprawność wynosi $\eta = 98$ — 99% . Znaczy to, że prawie całą energię elektryczną, jaką doprowadzamy do uzwojenia pierwotnego, możemy czerpać z uzwojenia wtórnego. Dzięki tej zaletie transformator uzyskał szerokie zastosowanie zarówno w dziedzinie prądów silnych jak i słabych. Możliwość przemiany danego napięcia przy pomocy transformatora na inne dowolnie żądane, stała się przyczyną powszechnego dziś stosowania prądu zmiennego zamiast stałego. Transformator bowiem może być stosowany tylko przy prądzie zmiennym. Przemiana napięć jest główną dodatnią cechą prądu zmiennego. Dowolne transformowanie napięcia pozwoliło ekonomicznie przesyłać energię elektryczną pod bardzo wysokim napięciem i dopiero w miejscu odbioru przekształcać ją na napięcie niskie, dogodne do użytku. Dzięki wysokiemu napięciu linii przesyłowych pracują one przy małych prądach, przez co możemy używać linii o małych przekrojach oraz uzyskać zmniejszenie strat w nich występujących, które rosną wraz z wielkością prądu. Pewną wadą prądu zmiennego jest możliwość istnienia przesunięcia fazy między napięciem i prądem, spowodowane występowaniem oporów urojonych obwodów. Mimo to prawie do wszystkich urządzeń elektrycznych używa się dzisiaj prądu zmiennego.

Transformatory buduje się najróżnorodniejszego rodzaju zależnie od mocy i przeznaczenia.

Autotransformator. Transformatory oszczędnościowe, tzw. autotransformatory (rys. 180), stosujemy przy małych mocach. Posiadają one tylko jedno uzwojenie. Z jednego ze zwojów tego uzwojenia wyprowadzamy odczep (c). Jeśli do zacisków (a—b) przyłączymy napięcie zasilające U_1 , to między punktami (c—b) otrzymamy też pewne napięcie U_2 . Stosunek napięć $U_1 : U_2 = Z_1 : Z_2$ jest równy stosunkowi całkowitej ilości zwojów (Z_1) uzwojenia do części uzwojenia (Z_2) zawartej między punktami (c—b). Część uzwojenia (c—b) przedstawia jakby uzwojenie wtórne transformatora. Jeśli po stronie pierwotnej autotransformatora płynie prąd I_1 a po jego stronie wtórnej prąd I_2 , wtedy w części wspólnej uzwojenia (c—b) płynie różnica prądów $I_2 - I_1$.

Transformator wielouzwojeniowy. W radiotechnice spotykamy często transformatory posiadające jedno uzwojenie pierwotne i kilka wtórnych. Schemat takiego transformatora podaje rys. 181. Po stronie pierwotnej mamy tam napięcie 220 V. Po stronie wtórnej otrzymujemy na jednym uzwojeniu 400 V, na drugim $2 \times 3,15$ V, na trzecim 4 V.

Transformator trójfazowy. Za pomocą transformatora możemy również transformować prąd trójfazowy. Mamy wtedy na rdzeniu żelaznym nawiniętych 6 uzwojeń (rys. 182). Trzy uzwojenia stanowią stronę pierwotną, trzy drugie stronę wtórnią. Uzwojenia strony pierwotnej łączymy w gwiazdę lub trójkąt i doprowadzamy do zacisków pierwotnych transformatora. Tak samo uzwojenia wtórne połączone w gwiazdę (Δ) lub trójkąt (Δ) doprowadzamy do zacisków strony wtórnej transformatora. Schematyczne przedstawienie transformatora trójfazowego podaje nam rys. 183a i b:

a — dla połączenia trójkąt-gwiazda Δ/Δ

b — dla połączenia gwiazda-gwiazda Δ/Δ

Budowa transformatorów. Rdzeń transformatora składa się z blach żelaznych izolowanych od siebie papierem, lakierem izolacyjnym lub utworzoną na powierzchni blach cienką warstwą tlenku żelaza. Wykonanie rdzenia z blach, a nie z pełnego żelaza, zmniejsza znacznie straty powstałe w żelazie (zob. rozdz. IX o stratach w żelazie). Rys. 184 przedstawia złożony rdzeń transformatora trójfazowego. Po złożeniu, blachy transformatora skręcamy śrubami; rdzeń izolujemy od uzwojenia warstwą preszpanu lub mikanitu. Jest to najczęściej kawałek rurki preszpanowej. Następnie nakładamy uzwojenie niskiego napięcia, potem znów warstwę preszpanu i uzwojenie wysokiego napięcia (rys. 185). Uzwojenia wykonujemy z izolowanego drutu miedzianego. Stosujemy miedź, aby mieć mały opór omowy uzwojeń. Dlaczego jednak nawijamy jedno uzwojenie na

drugim, a nie obok siebie? Otóż stosunek $\frac{U_1}{U_2} = \frac{Z_1}{Z_2}$ będzie prawie słuszny, jeśli spadki napięć: omowy i indukcyjny uczynimy jak najmniejszymi. Spadek omowy będzie mały, jeśli damy na uzwojenia dobrze przewodzący materiał — a więc miedź. Spadek indukcyjny zależy od wielkości strumienia rozproszenia, który przenika tylko jedno z uzwojeń. Aby uczynić go jak najmniejszym, czyli oba uzwojenia jak najsilniej sprząc, związać jakby razem za pośrednictwem strumienia głównego przechodzącego przez oba uzwojenia, nawijamy cewki na rdzeniu żelaznym, a prócz tego jak najbliżej siebie — a więc jedną na drugiej.

Końce obu uzwojeń doprowadzamy do zacisków wejściowych i wyjściowych transformatora.

Transformator olejowy. Transformatory dużych mocy, gdzie mamy znaczne prądy i napięcia, umieszczone są w pudłach żelaznych napełnionych olejem mineralnym. Olej ten ma za zadanie lepiej izolować uzwojenie od siebie i od rdzenia żelaznego oraz polepszyć warunki chłodzenia transformatora. Specjalne urządzenie mechaniczne powoduje stały ruch oleju wewnątrz pudła.

ROZDZIAŁ XI

MASZYNY ELEKTRYCZNE

Maszyny elektryczne dzielimy na prądnice czyli maszyny wytwarzające prąd i napięcie elektryczne oraz na silniki czyli maszyny przetwarzające energię elektryczną na pracę mechaniczną. W zależności od rodzaju prądu, przy którym maszyny pracują, rozróżniamy maszyny prądu stałego i maszyny prądu zmiennego. Omówimy kolejno budowę i pracę poszczególnych typów maszyn.

Prądnica prądu zmiennego. Na podstawie prawa indukcji (rozd. VII) wiemy, że w przewodzie przecinającym linie pola magnetycznego powstaje siła elektromotoryczna. Maszyna elektryczna zbudowana na tej zasadzie posiada więc dwie części: jedną ruchomą zwaną wirnikiem, drugą nieruchomą — jest to stojan. Jest zupełnie obojętne czy będziemy obracać uzwojenie maszyny względem stałych biegunów magnetycznych, czy też bieguny względem nieruchomego uzwojenia. W obu wypadkach zachodzi przecinanie linii pola magnetycznego przez uzwojenie prądnicy, a zatem indukowanie w nim siły elektromotorycznej. W maszynach prądu zmiennego dogodniej jest obracać bieguny względem nieruchomego uzwojenia. Dziś prawie wyłącznie jest budowany taki właśnie typ prądnicy.

Na wirniku prądnicy, wykonanym w kształcie koła z pełnego żelaza, umocowujemy szereg elektromagnesów (rys 186a). Elektromagnesy sąsiednie umieszczone są na przemian różnoimiennymi biegunami a więc N, S, N, S itd. Przewody elektromagnesów doprowadzamy do dwóch pierścieni miedzianych, umocowanych na wale maszyny. Są one pomiedzy sobą i od wału maszyny izolowane. Po pierścieniach ślizgają się kawałki węgla zwane szczotkami.

Do szczotek doprowadzamy prąd ze źródła prądu stałego, którym jest najczęściej mała prądnica prądu stałego, umieszczona na jednym wale z prądnicą prądu zmiennego. Prąd stały przepływa przez szczotki do pierścieni i dalej dostaje się do uzwojenia elektromagnesów, wywołując powstawanie stałego pola magnetycznego. Magnesy wirują wewnątrz stojana prądnicy. Stojan jest to pierścień utworzony z blach żelaznych izolowanych od siebie, posiadający wysztancowane żłobki (rys. 186b podaje część stajana.) W żłobkach są ułożone pręty miedziane izolowane bawełną, jedwabiem i preszpanem, stanowiące uzwojenie prądnicy. Pręty te są odpowiednio ze sobą połączone w szereg, równoległe lub szeregowo równoległe. Końce uzwojenia doprowadzamy do zacisków prądnicy. Z chwilą obracania wirnika za pomocą silnika spalinowego, maszyny parowej lub

turbiny, w uzwojeniu indukuje się siła elektromotoryczna. Jak wiemy jest ona sinusoidalnie zmienna. Czas potrzebny, aby pod prętem, pod którym znajdował się w danym momencie środek bieguna północnego N przeszedł biegun południowy S, a potem znów zjawił się środek następnego bieguna północnego N, odpowiada pełnemu okresowi siły elektromotorycznej. Jeśli maszyna posiada (p) par biegunów (para biegunów: N i S), które obracają się z prędkością n obrotów na minutę, to w czasie jednej minuty otrzymamy $n \cdot p$ okresów zmian sił elektromotorycznych. W czasie jednej sekundy otrzymamy $\frac{n \cdot p}{60}$ okresów. Stąd częstotliwość siły elektromotorycznej powstałej w prądniczy wynosi:

$$f = \frac{n \cdot p}{60} \text{ } \sim \text{/sek}$$

gdzie: p — ilość par biegunów
n — ilość obrotów na minutę

Mamy prądnicę prądu zmiennego o p = 6 par biegunów, a chcemy, aby częstotliwość prądu wynosiła f = 50 \sim /sek.

Jak prędko winniśmy obracać wirnik prądniczy?

$$n = \frac{f \cdot 60}{p} = \frac{50 \cdot 60}{6} = 500 \text{ obr/min.}$$

a więc z prędkością 500 obrotów na minutę.

Z powodu zmiennego pola magnetycznego, przenikającego przez stojan, powstają w nim straty w żelazie. Poza tym prąd płynący przez uzwojenie prądniczy wydziela ciepło na jego oporze omowym. Dlatego prądnicza grzeje się podczas pracy. Dopuszczalny przyrost temperatury uzwojenia ogranicza prąd, jaki możemy czerpać z prądniczy.

W identyczny sposób budujemy prądnicę prądu trójfazowego. Posiadamy tam zamiast tylko jednego, trzy oddzielne uzwojenia w ten sposób umieszczone, aby powstałe w nich siły elektromotoryczne przesunięte były względem siebie w fazie o kąt 120°.

Prądnicza prądu stałego. Stojan prądniczy prądu stałego wykonany jest z pełnego żelaza. Jest to obręcz, wewnątrz której umocujemy elektromagnesy (rys. 187). W środku tego wieńca utworzonego z elektromagnesów wiruje wirnik. Wirnik jest to walec zrobiony z blach żelaznych izolowanych od siebie, posiadający wysztancowane żłobki. W żłobkach układamy izolowane pręty miedziane stanowiące uzwojenie prądniczy. W czasie obrotu indukuje się w prętach siła elektromotoryczna, której wielkość i kierunek zależy od położenia pręta względem biegunów magnesu. Mamy więc i tu zmienną siłę elektromotoryczną.

Komutator. Zamiast zmiennej staramy się otrzymać stałą siłę elektromotoryczną. Do tego celu służy komutator. Jest to walec utworzony z izolowanych od siebie sztabek miedzianych, umocowany na jednym wale z wirnikiem prądniczy (rys. 188). Do każdej takiej sztabki, zwanej wycinkiem komutatora, przyłączamy jeden pręt uzwojenia

wirnika. Po komutatorze ślizgają się szczotki. Zasada pracy komutatora polega na tym, że w momencie, gdy szczotki znajdują się na danych dwu wycinkach komutatora, w dołączonych do tych wycinków prętach uzwojenia, indukuje się maksymalna siła elektromotoryczna. Szczotki, ślizgając się po wycinkach komutatora, zbierają stale maksymalną siłę elektromotoryczną. Otrzymujemy zamiast napięcia zmiennego stałe; proces ten zwiemy komutacją.

Wzbudzenie prądnicy prądu stałego. Uzwojenia elektromagnesów prądnicy prądu zmiennego zasilaliśmy z osobnego źródła prądu stałego. Jak postępujemy w prądnicach prądu stałego? Otóż wykorzystujemy w tym celu istnienie magnetyzmu szczątkowego. Jeśli wirnik prądnicy będziemy obracać, to pod wpływem istnienia w elektromagnesach magnetyzmu szczątkowego, na zaciskach prądnicy dostaniemy już pewne choć bardzo słabe napięcie stałe. Gdy do zacisków dołączymy uzwojenie elektromagnesów, to popłynie przez nie słaby prąd elektryczny. Wzmocni on jednak strumień elektromagnesów, a tym samym napięcie na zaciskach prądnicy. Wtedy prąd wzrośnie, wzrośnie strumień magnetyczny, a tym samym napięcie itd., aż otrzymamy nominalną wartość napięcia prądnicy. Mówimy, że wzbudzamy prądnicę. Należy tu uważać, aby przy dołączeniu uzwojenia elektromagnesów powstały w nim prąd wytworzył strumień o kierunku zgodnym ze strumieniem magnetyzmu szczątkowego, aby więc go wzmacniał. W przeciwnym wypadku zamiast wzbudzić prądnicę, zupełnie ją rozmagnesujemy, a wtedy musimy użyć do wzbudzenia osobnego źródła, np. akumulatora.

Prądnicą bocznikową, szeregową, szeregowo-bocznikową. Uzwojenie elektromagnesów możemy łączyć do zacisków prądnicy równolegle wraz z odbiornikiem (rys. 189) lub szeregowo (rys. 190). W pierwszym wypadku otrzymamy tzw. prądnicę bocznikową, w drugim szeregową. Napięcie prądnicy bocznikowej maleje nieznacznie przy wzroście prądu I płynącego przez odbiornik. Napięcie prądnicy szeregowej rośnie wraz z prądem I odbiornika. Jeśli na każdy z elektromagnesów nawiniemy dwa uzwojenia i jedno z nich dołączymy do zacisków prądnicy w szereg z odbiornikiem, a drugie równolegle, otrzymamy prądnicę szeregowo-bocznikową. Napięcie jej jest prawie stałe, niezależne od obciążenia (rys. 191). Wielkość napięcia prądnicy bocznikowej regulujemy oporem (r) włączonym w szereg z uzwojeniem elektromagnesu (rys. 189). Jest ona obok prądnicy szeregowo-bocznikowej powszechnie używana. Prądnicy szeregowej dziś zupełnie nie stosujemy.

Silniki elektryczne. W rozdziale V zapoznaliśmy się z zasadą powstawania momentu obrotowego na ramce miedzianej umieszczonej w stałym polu magnetycznym, przez którą płynie stały prąd elektryczny. Kierunek obrotu ramki w stosunku do kierunku pola magnetycznego i kierunku przepływu prądu określiła nam reguła lewej ręki. Stwierdziliśmy jeszcze, że moment obrotowy ramki nie jest stały, lecz zależy od położenia jej czyli od kąta α , jaki ramka tworzy z płaszczyzną pionową prostopadłą do linii pola magnetycznego. Ramka bowiem posiada maksy-

malny moment obrotowy dla położenia poziomego, podczas gdy dla położenia pionowego moment obrotowy równa się zero (rys. 192).

Warunkiem pracy każdego silnika jest istnienie stałego momentu obrotowego, działającego na wał maszyny. Silnik elektryczny posiadający tylko jedną ramkę miedzianą nie byłby zdolny obracać się. Mógłby on wykonać tylko najwyżej pół obrotu i w momencie, gdy ramka znalazłaby się w położeniu pionowym (moment równy zero), silnik zatrzymałby się. Chcąc nadać silnikowi stały moment obrotowy, dajemy wiele takich ramek rozłożonych równomiernie na okręgu koła, tak że moment sumaryczny pochodzący od oddziaływania pola magnetycznego na prąd w poszczególnej ramce, jest stały w czasie całego pełnego obrotu wału silnika.

Drugim warunkiem pracy silnika elektrycznego jest stały kierunek jego momentu obrotowego. Rozpatrzmy, jaki kierunek posiada moment obrotowy ramki w czasie pełnego jej obrotu przy założeniu stałego kierunku pola magnetycznego i stałego kierunku prądu płynącego przez ramkę. Rys. 192 a przedstawia ramkę umieszczoną w polu magnetycznym. Przy przyjętych kierunkach prądu w ramce i pola magnetycznego, ramka posiada moment obracający ją w kierunku zgodnym ze wskazówkami zegara. Moment ten będzie istniał do chwili, gdy ramka przyjmie położenie pionowe, poczem stanie się równy zero. Przy dalszym obrocie ramki (rys. 192 b) zauważymy, że przy zachowaniu kierunków pola magnetycznego i prądu w ramce, odwrócił się kierunek momentu (reguła lewej ręki). Ramka obraca się w stronę odwrotną, przeciwnie do ruchu wskazówki zegarka. Chcąc zachować ten sam kierunek momentu obrotowego, musimy zmienić w ramce kierunek prądu w momencie przejścia jej przez położenie pionowe (rys. 192 c).

Silnik prądu stałego. W silniku prądu stałego zmianę kierunku prądu w ramce wykonuje komutator na drodze mechanicznej. Jak działa komutator? W tym celu rozpatrzmy tylko jedną ramkę, do której dołączone są dwa izolowane od siebie półpierścienie. Po półpierścieniach ślizgają się szczotki doprowadzające do ramki prąd stały (rys. 193 a i b). Półpierścienie te obracają się wraz z ramką tak, że w momencie, gdy na rys. 193 a i b ramka przechodzi przez położenie pionowe, każda szczotka przechodzi z jednego półpierścienia na drugi, a tym samym zmienia się kierunek prądu w ramce. W silniku nie mamy jednej ramki lecz wiele takich ramek, to też komutator nie składa się z dwóch półpierścieni, lecz podobnie jak w prądnicy prądu stałego z szeregu izolowanych od siebie wycinków, tworzących razem walec osadzony na wspólnym wale z uzwojeniem silnika. Do każdego z wycinków komutatora dołączamy odpowiednio boki ramek tak, że ślizgające się po komutatorze szczotki doprowadzają do ramki prąd o odpowiednim kierunku w zależności od jej położenia względem biegunów silnika. Doprowadzając do zacisków silnika napięcie stałe, otrzymujemy w ten sposób stały moment obrotowy, działający w jednym i tym samym kierunku. Silniki prądu stałego są tak samo budowane jak prądnice. To też każdy silnik prądu stałego może być użyty jako prądnica i na odwrót, prądnica prądu stałego może pracować jako silnik. Podobnie jak przy prądni-

cach rozróżniamy silniki: bocznikowe, szeregowe, i szeregowo-bocznikowe.

Silnik bocznikowy. Silnik bocznikowy posiada obroty lekko malejące ze wzrostem momentu hamującego. Zwiększyć jego obroty w granicach 25% możemy, włączając w obwód elektromagnesu opór (rys. 194). Zmniejszenie obrotów od normalnych otrzymujemy za pomocą włączenia oporu (R) w szereg z uzwojeniem wirnika. Jest to jednak regulacja bardzo nieekonomiczna, gdyż pociąga za sobą znaczną stratę energii elektrycznej występującej w postaci ciepła w oporze R (rys. 194).

Silnik szeregowy. Obroty silnika szeregowego maleją znacznie ze wzrostem momentu hamującego. Przy zupełnym zniesieniu momentu hamującego silnik osiąga bardzo duże obroty, mogące doprowadzić do jego zniszczenia. Dlatego silnik ten załączamy zawsze pod obciążeniem wału momentem hamującym. W innym wypadku, możemy doprowadzić do rozbiegania się silnika, czyli osiągnie on tak znaczne obroty, że spowodują one jego uszkodzenie.

Silnik szeregowo-bocznikowy. Zaletą silnika bocznikowego są jego prawie stałe obroty mało zależne od obciążenia. Wadą natomiast jest jego zbyt mały moment rozruchowy. Odwrotnie zaletą silnika szeregowego jest jego bardzo duży moment rozruchowy, posiada on natomiast obroty zależne od obciążenia. Chcąc otrzymać silnik o dość znacznym momencie rozruchowym, a jednocześnie posiadający prawie stałe obroty, zbudowano silnik szeregowo-bocznikowy.

Posiada on prócz bocznikowego uzwojenia elektromagnesów, jeszcze uzwojenie szeregowe, którego strumień magnetyczny wzmacnia strumień powstały od uzwojenia bocznikowego.

Zmiany kierunku obrotów silnika otrzymujemy przez zmianę kierunku prądu albo w uzwojeniu elektromagnesów albo wirnika. Wszystkie silniki pobierają z sieci większy prąd wraz ze zwiększeniem momentu hamującego wału. Dlatego na tabliczkach silnika podana jest maksymalna moc KM (konie mechaniczne), jaką wolno czerpać z silnika. Prócz tego podane są nominalne obroty (n) i napięcie pracy silnika. $N_p = 3 \text{ KM}$ $U = 220 \text{ V}$ $n = 1500 \text{ obr./min}$. Przy pobraniu nadmiernej mocy wzrośnie prąd w uzwojeniu wirnika, powodując nadmierne jego grzanie, mogące doprowadzić do spalenia izolacji a tym samym zniszczenia silnika. Silnika nie należy przeciążać.

Rozruch silników. Tak jak w prądnicy, powstaje w silniku z chwilą obrotów siła elektromotoryczna, tym większa, im większe posiada on obroty. Ta siła elektromotoryczna przeciwdziała napięciu przyłożonemu do silnika, a tym samym warunkuje prąd jaki silnik pobiera.

Jeśli więc nie obracający się silnik załączymy na przepisane mu napięcie, to w pierwszej chwili popłynie przez uzwojenie tak znaczny prąd, że może on spowodować jego spalenie. Dlatego silniki musimy załączać na napięcie mniejsze od nominalnego, a dopiero z chwilą osiągnięcia przez niego obrotów doprowadzać napięcie do wartości nominalnej.

Oporniki rozruchowe. Do tego celu służą oporniki rozruchowe R (rys. 195). Włączamy je w szereg z uzwojeniem silnika. Dławia one napięcie a tym samym przepuszczają przez uzwojenie silnika prąd, którego natężenie nie przekracza wartości dopuszczalnej. W miarę gdy silnik nabiera obrotów, wyłączamy stopniowo opór rozruchowy z obwodu. Nie należy jednak używać oporów rozruchowych do regulacji obrotów silnika. Obliczone są one bowiem na krótkotrwałą pracę i łatwo mogą się przepalić. W momencie ruszania silnik posiada pewien moment obrotowy, zwany momentem rozruchowym. Staramy się go uczynić zawsze jak największym. Dlatego w silniku bocznikowym (rys. 195) uzwojenie elektromagnesów załączamy od razu na pełne napięcie źródła. Wpływa to na zwiększenie momentu rozruchowego. Silnik szeregowy posiada szczególnie silny moment rozruchowy i dlatego stosujemy go w urządzeniach wymagających znacznego momentu rozruchowego, w których obroty mogą maleć z obciążeniem. Będą to tramwaje, koleje elektryczne, dźwignice, walcownie itd.

Silniki bocznikowe mają zastosowanie wszędzie tam, gdzie wymagana jest stała ilość obrotów i możliwość oszczędnej ich regulacji. Takim urządzeniem są w pierwszym rzędzie obrabiarki do metalu.

Silniki asynchroniczne trójfazowe. Silniki asynchroniczne trójfazowe pracują na innej zasadzie niż dotychczas omówione silniki prądu stałego i zmiennego. Stojan silnika asynchronicznego zbudowany jest tak samo jak stojan prądnicy trójfazowej. Posiada on ułożone w żłobkach trzy uzwojenia połączone w gwiazdkę lub trójkąt (rys. 196). Wirnik silnika wykonany jest jak stojan z blach żelaznych od siebie izolowanych. W wystancowanych żłobkach układamy niez izolowane pręty miedziane, które połączone są ze sobą na obu swych końcach za pomocą dwóch pierścieni miedzianych (rys. 197). Prąd zmienny trójfazowy doprowadzamy tylko do uzwojenia stojana. Powstaje wtedy zmienne pole magnetyczne. Ponieważ maksymalne wartości prądów powstają kolejno w poszczególnych fazach I, II, III, więc i maksymalny strumień będzie kolejno wytwarzany w fazach I, II, III. Fazy te są ułożone wzdłuż okręgu koła. Maksymalny strumień magnetyczny powstaje najpierw w fazie I, potem II, potem III, a następnie znów w fazie I, itd. (rys. 198). Wygląda to tak, jakby strumień maksymalny kręcił się wkoło. Takie pole magnetyczne zwiemy — polem wirującym. W prętach wirnika pod wpływem tego pola indukuje się prąd, gdyż linie sił wirującego pola magnetycznego przecinają uzwojenie wirnika. Prąd ten będzie najmniejszy, jeśli wirnik obracać się będzie z prędkością bliską prędkości pola, bowiem wtedy prawie jednoczesny obrót pola i wirnika powoduje wolniejsze przecinanie uzwojenia wirnika przez linie pola wirującego. Byłby on zaś największy przy wirniku nieruchomym. Układ elektryczny dąży zawsze do wydania z siebie najmniejszej ilości energii. W silniku asynchronicznym istnieć to będzie wtedy, gdy w wirniku indukuje się najmniejszy prąd. To też uzwojenie wirnika jest jakby pociągane przez pole wirujące stojana; wirnik kręci się, osiągając obroty równe prawie obrotom pola magnetycznego, które wynoszą:
$$n = \frac{f \cdot 60}{p}$$

Gdyby wirnik osiągnął obroty równe obrotom pola, przewody jego nie przecinałyby linii pola magnetycznego, nie indukowałyby się w nich żaden prąd, a zatem zniknąłby jednocześnie moment obrotowy wirnika. To też obroty silnika są mniejsze od obrotów pola magnetycznego, a różnica ich jest tym większa, im bardziej obciążymy wał silnika.

Poślizg. Różnicę obrotów silnika w stosunku do obrotów pola zwiemy poślizgiem. Poślizg jest tym większy, im bardziej obciążamy silnik, jednocześnie w obu uzwojeniach płyną większe prądy. Poślizg wynosi 3—5% obrotów pola. Tak np. silnik, którego pole posiada 1500 obrotów na minutę, wiruje przy normalnym obciążeniu z prędkością $n = 1450$ obrotów na minutę. Dzięki swej prostej budowie silniki asynchroniczne posiadają szerokie zastosowanie.

Silniki klatkowe. Budowa silnika asynchronicznego tego typu przypomina klatkę zwiemy go też silnikiem klatkowym. Ma on tę wadę, że posiada mały moment rozruchowy; stosujemy więc go tam, gdzie możemy silnik puścić w ruch bez obciążenia, a dopiero po osiągnięciu przez niego nominalnych obrotów, za pomocą sprzęgła włączyć na jego wał obciążenie mechaniczne.

Rozruch. Prąd silników klatkowych w momencie rozruchu jest bardzo duży i przewyższa 4—6-krotnie prąd pracy. Dlatego o ile małe silniki możemy jeszcze załączać bezpośrednio na sieć o tyle silniki większe załączamy za pomocą oporów rozruchowych. Wtedy silniki pracują najpierw na małym napięciu, a dopiero z chwilą osiągnięcia już obrotów otrzymują pełne napięcie nominalne. Do rozruchu stosujemy też często przełącznik gwiazda-trójkąt i tak silnik zbudowany na pracę w połączeniu trójkątnym załączamy w gwiazdę i przyłączamy do sieci. Niech napięcie sieci wynosi $U = 380$ V. W połączeniu gwiazdy napięcie przyłożone na każdą fazę silnika będzie wynosić:

$$U \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = 380 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = 220$$

Silnik pracuje więc na mniejszym napięciu. Po uruchomieniu silnika, przyłączamy uzwojenie z gwiazdy w trójkąt, wtedy każda z faz otrzyma już normalne napięcie pracy $U = 380$ V.

Ze względu na duży prąd rozruchowy silnika, załączamy go często na sieć przez dwa układy bezpieczników: jeden z nich służy tylko do rozruchu, drugi do pracy. W czasie rozruchu bezpieczniki pracy są zwarte.

Silniki klatkowe posiadają prawie stałą liczbę obrotów mniejszą o poślizg od obrotów pola. Regulacja ich jest niemożliwa. Możemy co prawda, zmieniając ilość biegunów silnika, a więc przyłączając odpowiednio cewki stojana, zmieniać obroty pola magnetycznego, a tym samym obroty silnika. Jest to jednak regulacja bardzo dużymi stopniami. Np. zamiast obrotów 1450 otrzymamy 725 obrotów na minutę. Ciągła regulacja obrotów tak jak w silniku prądu stałego jest w silnikach klatkowych nie możliwa.

Silniki dwuklatkowe. Chcąc otrzymać w silnikach klatkowych większy moment rozruchowy, musimy w czasie rozruchu zwiększyć opór wirnika. W tym celu budujemy tzw. silniki dwuklatkowe. Ich cechą charakterystyczną jest to, że w momencie rozruchu otrzymujemy na drodze elektrycznej duży opór wirnika, zanikający następnie w czasie pracy. Silniki te mają większy moment rozruchowy i mniejszy prąd rozruchu niż silniki jednoklatkowe.

Silnik pierścieniowy. Specjalna budowa silników asynchronicznych, co prawda kosztowniejsza, umożliwia otrzymanie bardzo znacznego momentu rozruchowego i pewnej ciągłej choć dość nieekonomicznej regulacji obrotów. Jest to silnik asynchroniczny pierścieniowy. Uzwojenie jego wirnika jest zrobione z izolowanych prętów miedzianych tak jak uzwojenie stojana. Jedne końce każdego z trzech uzwojeń łączymy w gwiazdę, drugie dołączamy do trzech pierścieni miedzianych umocowanych na wale silnika. Po pierścieniach ślizgają się szczotki. Do nich dołączamy opornik R (rys. 199). W momencie rozruchu załączamy opór (R) w szereg z uzwojeniem wirnika, zwiększając w ten sposób jego opór, a tym samym moment rozruchowy. Podczas pracy opór (R) wyłączamy, a specjalne urządzenie podnosi szczotki i zwiera pierścienie miedziane. Oporem (R) możemy również regulować w czasie pracy obrotu silnika. Będą one tym mniejsze im większy opór (R) załączymy w szereg do uzwojenia wirnika. Jest to jednak regulacja nieekonomiczna, gdyż tracimy dużą część energii elektrycznej w oporze (R). Budowa silników pierścieniowych jest bardziej kosztowna od silników klatkowych, to też stosujemy je tylko tam, gdzie specjalnie zależy nam na znacznym momencie rozruchowym i możliwości choć nieekonomicznej regulacji obrotów.

Silniki asynchroniczne otrzymały też nazwę silników indukcyjnych, bowiem prąd w wirniku powstaje dzięki zjawisku indukcji.

Kierunek obrotów silnika asynchronicznego zmieniamy, przełączając na zaciskach stojana kolejność dwóch faz. Silniki asynchroniczne mają bardzo szerokie zastosowanie, gdyż są tanie i łatwe w użyciu.

Silniki komutatorowe prądu zmiennego. Konieczność posiadania silników prądu zmiennego, mających ciągłą i ekonomiczną regulację obrotów, doprowadziła do budowy silników komutatorowych prądu zmiennego. Są to silniki prądu zmiennego, posiadające — tak jak silniki prądu stałego — komutator. Specjalne połączenie umożliwiają szeroką i ekonomiczną regulację obrotów. Jednak budowa tych silników jest dość skomplikowana i nie będziemy bliżej jej omawiać. Zastosowanie silników komutatorowych jest ograniczone ze względu na ich wysoką cenę. Dziś jednak buduje się coraz więcej silników komutatorowych, które wypychają powoli silniki prądu stałego, niewygodne z powodu konieczności instalowania specjalnej sieci prądu stałego.

ROZDZIAŁ XII

WYŁADOWANIA W GAZACH I PRÓŻNI

Zjawiska wyładowań elektrycznych są najlepszym dowodem, że w gazach jony przenoszą elektrony (piorun). Również w elektrotechnice wyładowania w gazach znalazły praktyczne zastosowanie (lampy łukowe, sygnalizacyjne lampki neonowe, reklamowe oświetlenie neonowe itd.).

Jeśli na dwie płytki metalowe (elektrody) oddzielone od siebie przestrzenią wypełnioną powietrzem lub gazem załączymy do źródła prądu, jak to pokazuje rys. 200, to według naszych poprzednich rozważań mamy obwód elektryczny otwarty i prąd elektryczny płynąć nie powinien. Jest jednak inaczej. W danej zawartości gazu nigdy wszystkie atomy gazu nie są obojętne elektrycznie. Pewna ich część posiada zawsze za dużo lub za mało elektronów tak, że w gazie poza obojętnymi elektrycznie atomami istnieją jego jony dodatnie i ujemne. Jony te będą wędrować do odpowiednich elektrod, pobierając lub oddając elektrony. Mamy tu przepływ prądu elektrycznego dzięki przenoszeniu elektronów przez jony, podobnie jak przy zjawiskach elektrochemicznych.

Jonizacja lawinowa. Począwszy od pewnego dostatecznie wysokiego napięcia, duża szybkość przepływających w gazie jonów staje się przyczyną powstawania coraz to większej liczby jonów. Jeśli mianowicie jon spotka na swej drodze obojętne elektrycznie atomy gazu i uderzy w nie z dostateczną siłą, wybije wtedy z nich elektrony, przez co atomy te staną się dodatnimi jonami. Tak powstałe nowe jony, uderzając o dalsze atomy, powodują dalszą jonizację, podczas gdy wybite elektrony przez połączenie z obojętnymi atomami tworzą jony ujemne. Przez ciągłe powtarzanie się na wielu atomach tego zjawiska powstają stale nowe jony i prąd jonowy sam się podtrzymuje. Proces ten, który zachodzi tylko przy dostatecznie dużym napięciu na elektrodach, nosi nazwę jonizacji lawinowej. Tawarzyszy mu zjawisko jarzenia się gazu. Zostało to wykorzystane w małych lampkach wypełnionych neonem, w neonowym oświetleniu reklamowym, popularnie zwanym neonówkami. We wszystkich tych wypadkach można stosować zarówno źródło prądu stałego jak i zmiennego. Aby wzbudzić jonizację lawinową, trzeba jednak odpowiednio dużego napięcia, zwanego napięciem zapłonu. Wielkość tego napięcia zależy od odległości i wielkości elektrod, od rodzaju zastosowanego gazu i od ciśnienia pod jakim się on znajduje. Gdy jonizacja lawinowa już nastąpiła, trwać ona będzie nadal wraz z towarzyszącym jej zjawiskiem jarzenia mimo nieznacznego obniżenia napięcia panującego między elektrodami. Dopiero przy pewnym napięciu, zwanym napięciem gaśnięcia, samoczynna jonizacja ustanie.

Lampki neonowe (neonówki). Małe lampki neonowe mają napięcie zapłonu około 90 V, zaś gaśnięcia 80 V. Przy lampkach neonowych przeznaczonych na napięcie 220 V wynosi ono odpowiednio 165 i 145 V. Lampki neonowe o słabej sile światła wyróżniają się nadzwyczaj małym poborem mocy. Służą więc one przede wszystkim jako lampki kontrolne, sygnalizacyjne i pomiarowe. W zwykłych żarówkach oświetleniowych większość energii elektrycznej tracona jest na ciepło i tylko częściowo zamienia się na energię świetlną.

W neonówkach natomiast energia elektryczna zamienia się bezpośrednio prawie całkowicie w energię świetlną, przez co nazywają się one również zimnymi źródłami światła. Rys. 201 przedstawia schematycznie układ elektrod w neonówkach. Są one ukształtowane w formie dwu blaszek lub drutów spiralnie zwiniętych.

Reklamy neonowe. Lampy oparte na zasadzie wyładowań elektrycznych w gazach nie nadają się dla celów oświetleniowych w mieszkaniach. Aby bowiem otrzymać praktycznie dostateczną ilość światła, należałoby stosować dość wysokie napięcia, nadto z powodu małej bezwładności cieplnej lamp neonowych, dawałoby się wyczuwać nawet przy częstotliwości $f = 50 \sim / \text{sek.}$ nieznaczne miganie ujemnie oddziałujące na wzrok. Znalazły one natomiast zastosowanie w oświetleniu reklamowym, gdzie przy odpowiednim doborze gazu i kolorze szkła rury, otrzymuje się rozmaite barwy światła. Neon jarzy się czerwono, hel różowo a w żółtym szkłe żółto. Neon z domieszką rtęci daje oświetlenie niebieskie, a w szkłe żółtym zielone. Napięcie zapłonu takich rur neonowych wynosi dla średnicy rury 8 mm około 1700 V, zaś dla średnicy 30 mm około 600 V na metr bieżący rury. Pobór prądu około 20 mA dla średnicy 8 mm i 120 mA dla średnicy 30 mm. Czas życia rur neonowych około 4000 godzin.

Przepływ elektronów w próżni. Przepływ prądu elektrycznego pomiędzy dwoma elektrodami zapomocą bezpośredniego przepływu elektronów jest możliwy również w lampie, z której wypompowano powietrze, a więc gdzie praktycznie nie ma ani jonów ani atomów. Jedną z elektrod tzw. katoda winna być zrobiona z materiału łatwo wysyłającego elektrony i należy rozżarzyć ją do odpowiednio wysokiej temperatury (500 do 2000° C). Na tej zasadzie zbudowane są lampy tzw. elektronowe (radiowe), rentgenowskie, telewizyjne itp.

Łuk elektryczny. Jeśli pomiędzy dwoma elektrodami uderzenia dodatnich jonów o katodę są dostatecznie silne, katoda zostaje rozgrzana do białości. Jarzenie gazu przechodzi w wyładowanie łukowe. Prąd elektryczny jest teraz utrzymywany przez lawinową jonizację jak i przez bezpośrednią emisję elektronów z rozżarzonej katody. Przy wyładowaniach łukowych elektrody rozgrzewają się do bardzo wysokich temperatur (4000° C). Wykorzystano to w łukowych piecach i w łukowych spawarkach elektrycznych.

Lampy łukowe. Dla celów oświetleniowych stosowano również lampy łukowe, gdzie elektrody wykonywano z węgla. Przy stosowaniu

prądu stałego elektroda węglowa, do której przyłożone jest napięcie dodatnie (anoda), jest głównym źródłem światła i spala się znacznie szybciej, przez co tworzy się na niej krater (rys. 202 a). Przy prądzie zmiennym spalanie elektrod jest równomierne (rys. 202 b). Dobry łuk elektryczny otrzymuje się przy napięciach 30—50 V. Konieczność zetknięcia elektrod dla zapalenia łuku, wymagająca użycia dość skomplikowanego mechanizmu, oraz szybkie odparowywanie elektrod wymagające ciągłego ich zsuwania i wymiany, jak również konieczność częstego oczyszczania lamp, sprawiły że węglowe lampy łukowe wyszły dziś z użycia i służą obecnie jedynie do celów specjalnych.

Wyładowania atmosferyczne. Wyładowania atmosferyczne w przyrodzie znane nam są w postaci piorunów. W upalne letnie dni, pod wpływem działania promieni słonecznych silnie ogrzewających powierzchnię ziemi, bezpośrednio z niej jak również z powierzchni jezior i rzek parują cząsteczki wody. Przy współdziałaniu wiatru unoszą się one pod postacią pary wraz z masami powietrza w górę, tworząc obłoki i chmury. Cząsteczki unoszącej się pary zawierają w swych atomach jak zawsze elektrony. Ponieważ w wyższych warstwach nad ziemią jest chłodniej, dlatego poczynają się z nasyconych chmur wydzielać duże krople wody spadające ku ziemi. Pod wpływem porywistych podmuchów wiatru wionącego w górę, zostają z powierzchni tych kropeł oderwane małe cząsteczki wody, niosące ze sobą ujemne ładunki (elektrony). Prąd powietrza porywa je coraz wyżej w górę, podczas gdy powstałe duże krople wody naładowane dodatnio skutkiem utraty elektronów spadają na ziemię (rys. 203). W ten sposób pod wpływem wiatru wionącego w górę powstał rozdział ładunków elektrycznych. Gdy wywołane tym rozdzieleniem napięcie elektryczne między górną a dolną warstwą osiągnie dostatecznie dużą wartość, nastąpi wyładowanie elektryczne pod postacią pioruna do ziemi lub między chmurami. Z nim związane jest znane nam już zjawisko jonizacji lawinowej i jarzenia (błyskawica).

Natężenie prądu pioruna jest najczęściej rzędu od paru tysięcy do 50 tysięcy amperów, jakkolwiek w rzadkich wypadkach dochodzi do 200 tysięcy Amp. Napięcie między końcami pioruna jest rzędu kilkudziesięciu milionów woltów. Czas trwania wyładowania jest nadzwyczaj krótki i wynosi od 10 do 100 mikrosekund:

$$\left(1\mu \text{ sek} = \frac{1}{1000000} \text{ sek} \right)$$

Na uderzenia pioruna są na ogół najbardziej narażone punkty wystające wysoko nad powierzchnią ziemi, jak wieże kościołów, odosobnione lub w górach stojące domy i drzewa. Uderzenie pioruna następuje w miejscach, gdzie znajdują się dobrze przewodzące punkty ziemi, a więc np. w pobliżu strumieni i jezior, podziemnych źródeł wodnych lub złożów rud metali. Tym tłumaczy się często, że piorun nie zawsze uderza w punkty najwyższej stojące nad powierzchnią lecz w niższe, leżące obok ale lepiej przewodzące.

Dla zabezpieczenia budynków przed zapaleniem od piorunów stosowane są znane urządzenia piorunochronne. Składają się one z pręta metalowego sterczącego ponad chronione zabudowanie połączonego przez przewód odprowadzający z zakopaną głęboko w ziemi płytą uziemiającą. Metalowe części budynku jak rynny itp. winny być ze sobą połączone i również dołączone do przewodu uziemiającego. Właściwy sposób zakładania urządzeń piorunochronnych normują specjalne przepisy.

ROZDZIAŁ XIII

TERMOELEKTRYCZNOŚĆ

Energię ciepłą można przekształcić bezpośrednio w energię elektryczną. Czynimy to za pomocą urządzeń zwanych termoelementami. Jeśli mianowicie będziemy podgrzewać miejsce styku dwu różnych metali np. miedzi i konstantanu, stanie się ono wówczas źródłem siły elektromotorycznej. Wielkość napięcia, które pokaże załączony miliwoltomierz (rys. 204), zależna jest od temperatury (od stopnia podgrzania) i rodzaju zastosowanych metali. Wynosi ono średnio 4 mV dla każdych 100° C. Otrzymywanie energii elektrycznej na tej drodze całkowicie się nie opłaca, gdyż napięcia są zbyt małe, a nadto zaledwie 1% energii cieplnej zamienia się na energię elektryczną, zaś 99% traci się bez wykorzystania. Termoelementy znalazły jednak praktyczne zastosowanie w dwu wypadkach: do pomiaru wysokich temperatur i do pomiaru natężenia prądu elektrycznego.















Ponieważ, jak już zaznaczyliśmy, wielkość napięcia wskazywana przez miliwoltomierz załączony na termoelement, zależna jest od wysokości temperatury, która panuje w miejscu zlutowania czy zespojenia metali, przeto miliwoltomierz, będąc wycechowany wprost w stopniach, może służyć jako termometr.

Jeszcze szersze zastosowanie znalazły termoelementy jako przyrządy do pomiaru natężenia prądu elektrycznego, czyli jako amperomierze, zwłaszcza przy prądach szybkozmiennych (radiotechnika). Urządzenie takiego popularnie zwanego „termo“ jest następujące (rys. 205): Prąd zmienny, przepływając przez drucik oporowy, rozgrzewa go, ten zaś ze swej strony podgrzewa termoelement. Na termoelement załączony jest czuły i dokładny przyrząd do pomiaru prądu stałego, jakim jest np. przyrząd magneto-elektryczny. Wychylenia tego przyrządu zależne będą od wzbudzonej w termoelemente siły elektromotorycznej, a więc od stopnia nagrzania termoelementu, czyli bezpośrednio od wielkości prądu zmiennego podgrzewającego drucik oporowy. W ten sposób za pośrednictwem termoelementu prąd zmienny zostaje zmierzony przy pomocy czułego przyrządu prądu stałego. Terma takie nadają się oczywiście także i do pomiaru prądu stałego. Ze względu jednak na ich wysoką cenę stosuje się je zwykle tylko tam, gdzie są nieodzowne, a więc do pomiaru prądów szybkozmiennych, np. w obwodach i antenie radiowej.

ROZDZIAŁ XIV

POMIARY ELEKTRYCZNE

Zestawienie elektrycznych przyrządów pomiarowych. W rozdziałach poprzednich poznaliśmy budowę całego szeregu elektrycznych przyrządów pomiarowych. Dla przejrzystości zgrupujemy je wszystkie razem w formie poniższego zestawienia:

Typy przyrządów	Zasada działania	Cecha	Skala	Na prąd: zmienny  stały 	Przeznaczenie przyrządu	U w a g i
Ciepłe	Wydłużenie się druczka pod wpływ. ciepła wywołanego przepływem prądu		Kwadratowa	 	Amperomierze	Rzadko dziś używane wyparte przez term.
Magneto- elektryczne	Działanie strumienia magnesu stałego na cewkę z prądem		Linowa		Amperomierze Voltomierze	Przyrządy bardzo czułe i dokładne
Elektro- magnetyczne	Działanie strumienia magnetycznego cewki z prądem na rdzeń z miękkiego żelaza		Na początku skali zagęszczenie dalej liniowa	 	Amperomierze Voltomierze	
Elektro- dynamiczne	Oddziaływanie strumieni dwóch cewek z prądem na siebie			 	Amperomierze Voltomierze Wattomierze	
Termoelementy	Powstawanie SEM przez podgrzanie miejsca styku dwóch różnych metali	Termo	Skala zależna od charakterystyki termu zwykle na początku zagęszczona		Amperomierze Termometry	Używane dla wysokiej częstotliwości
Indukcyjne	Działanie strumienia magnetycznego na indukowane prądy wirowe				Liczniki energii elektrycznej	

Amperomierz. Amperomierze są to przyrządy służące do pomiaru wielkości natężenia prądu elektrycznego. Amperomierze posiadają z zasady bardzo małą oporność wewnętrzną (od części oma do paru omów), skutkiem czego spadek napięcia na amperomierzu jest bardzo mały,

Pomiar natężenia prądu. Amperomierz załącza się zawsze w przewód w szereg ze źródłem i odbiornikiem energii tak, aby prąd, którego wielkość chcemy zmierzyć, przepływał przez amperomierz (rys. 206 a i b). Na rys. (206 b) amperomierz 2 wykaże prąd płynący przez odbiornik R_2 , amperomierz 3 pokaże prąd pobierany przez odbiornik R_3 , zaś amperomierz 1 całkowity prąd pobierany przez układ ze źródła. Prąd, jaki pokaże amperomierz 1, będzie się równał sumie prądów, wskazywanych przez amperomierze 2 i 3 zawsze dla prądu stałego, natomiast dla prądu zmiennego, w wypadku gdy w obwodzie są

tylko opory rzeczywiste, a więc nie ma przesunięcia fazy między napięciem i prądem. Jeśli w obwodzie prócz oporów rzeczywistych są jeszcze opory urojone (cewka, kondensator), to wtedy przy prądzie zmiennym występuje przesunięcie fazy między prądami I_1 , I_2 i I_3 . Suma arytmetyczna prądów I_2 i I_3 nie będzie się równać prądowi I_1 , a więc i suma wskazań amperomierza A_2 i A_3 nie będzie równa wskazaniu amperomierza A_1 . Prądy należy dodawać wtedy geometrycznie, gdyż ich suma geometryczna równa się prądowi I_1 . Wskazania amperomierza A_2 i A_3 dodane geometrycznie, czyli przy uwzględnieniu faz prądów I_2 i I_3 , dadzą wartość prądu I_1 , wskazywaną przez amperomierz A_1 .

Przed załączeniem amperomierza należy zawsze zwrócić uwagę na zakres przyrządu, na który jest on przeznaczony i wybrać do pomiaru taki przyrząd, by jego zakres był zawsze nieco większy od przypuszczalnej wielkości prądu mierzonego. Przepływ większego prądu przez amperomierz niż maksymalny prąd zakresu przyrządu, spali przyrząd lub powoduje wybicie wskazówki poza obręb skali i jej zgięcie. Nigdy nie wolno załączać amperomierza bezpośrednio na bieguny źródła, gdyż z powodu małej jego oporności wewnętrznej przepłynie wówczas przez niego prąd zwarcia, który go momentalnie spali. Jeśli amperomierz jest przeznaczony tylko do pomiaru prądu stałego (magneto elektryczny), należy zwrócić uwagę, by końce amperomierza oznaczone przez $+$ i $-$ łączyć poprzez odbiornik, którego pobór prądu chcemy zmierzyć na odpowiednie bieguny źródła. W przeciwnym razie wskazówka amperomierza wybiję w niewłaściwą stronę i może ulec wygięciu.

Zmiana zakresu pomiarowego amperomierza. Przez załączenie równoległe z amperomierzem odpowiedniego oporu, czyli przez tzw. zabocznikowanie, zakres pomiarowy amperomierza można powiększyć. Zrozumiemy to najlepiej na następującym przykładzie:

Przykład 49.

Jaki opór R należy załączyć równoległe do amperomierza o oporności wewnętrznej 1Ω , przeznaczanego do pomiaru prądów w zakresie od $0 - 5$ amperów, aby móc nim mierzyć prądy od $0 - 25$ amperów (rys. 207)?

Ponieważ amperomierz przeznaczony jest najwyżej na prąd 5-ampereowy, chcąc mierzyć nim prąd 25-ampereowy musimy równoległe do niego załączyć opór R , o takiej oporności w stosunku do oporności wewnętrznej amperomierza, by przez niego przepływała nadwyżka 20 A , zaś przez sam przyrząd jedynie dopuszczalne 5 A . Spadek napięcia na zaciskach przyrządu ($a - b$) przy prądzie 5 A i oporze wewnętrznym $R_a = 1 \Omega$ na zasadzie prawa Ohma będzie:

$$U - I_a \cdot R_a = 5 \cdot 1 = 5 \text{ V}$$

Ten sam spadek napięcia musi panować na oporze R przy przepływającym przez niego prądzie $I_R = 20 \text{ A}$, więc:

$$U = I_R \cdot R \quad \text{stąd} \quad R = \frac{U}{I_R} = \frac{5}{20} = 0,25 \Omega$$

Załączywszy więc na nasz amperomierz równolegle opór $R = 0,25 \Omega$, odczyty na skali 0, 1, 2, 3, 4, 5 A będą odpowiadały prądom płynącym w obwodzie 0, 5, 10, 15, 20, 25 A. W ten sposób zakres pomiarowy przyrządu powiększyliśmy 5-krotnie. Każdy odczyt na skali przyrządu należy mnożyć przez 5. Opór R nazywamy bocznikiem amperomierza.

Woltomierz. Woltomierze są to przyrządy służące do pomiaru wielkości napięcia elektrycznego. Woltomierze nie są niczym innym jak właściwie amperomierzem o bardzo dużej oporności wewnętrznej rzędu od kilku tysięcy do kilkudziesięciu tysięcy, a nawet kilkuset tysięcy omów. Skutkiem tego prąd pobierany przez woltomierz jest bardzo mały. Prąd płynący przez przyrząd woltomierza porusza jego wskazówkę. Znając opór woltomierza i wielkość prądu, znajdziemy z prawa Ohma ($U = I \cdot R$) wielkość napięcia, na jakie woltomierz został załączony. Przeskalowawszy woltomierz w voltach, możemy mierzyć nim napięcie.

Pomiar napięcia. Woltomierz łączy się zawsze równolegle na to źródło prądu lub na ten odbiornik energii elektrycznej względnie opór, na którym chcemy mierzyć napięcie lub jego spadek (rys. 208 a i b).

Na rys. 208 a załączony woltomierz pokaże nam napięcie na zaciskach źródła, które jest równe spadkowi napięcia na oporze odbiornika. O ile źródło nie jest obciążone (bieg luzem), wówczas woltomierz o dużym oporze w stosunku do oporności wewnętrznej źródła (aby można było z dostatecznym przybliżeniem przyjąć, że prąd przez woltomierz nie płynie) pokaże wartość siły elektromotorycznej źródła. Na rys. 208 b woltomierz 2 mierzy spadek napięcia na oporze R_2 , zaś woltomierz 3 spadek napięcia na oporze R_3 względnie R_1 (spadki napięć na oporach R_3 i R_1 są sobie równe). Woltomierz 1 wskaże napięcie na zaciskach źródła, które będzie równe sumie wskazań spadków napięć woltomierzy 2 i 3 (jeśli nie ma przesunięcia fazowego).

Amperomierz z szeregowym oporem jako woltomierz. Amperomierz można wykorzystać do pomiarów napięć przez połączenie z nim w szereg odpowiednio dużego oporu. Amperomierz musimy następnie przeskalować w voltach. Do tego celu nadają się jednak tylko czułe amperomierze czyli mili- i mikro-amperomierze, w przeciwnym bowiem razie tak zrobiony woltomierz będzie pobierał duży prąd i obciążał źródło. Ilustruje to następujący przykład:

Przykład 50.

Amperomierzem o oporze wewnętrznym 1Ω i o zakresie pomiarowym do 5 A chcemy mierzyć napięcie do 200 V. Jaki opór należy w szereg z amperomierzem załączyć i jaki prąd będzie pobierał taki woltomierz?

Największy prąd dopuszczalny dla amperomierza, przy którym wskazówka daje pełne wychylenie na skali, wynosi 5 A. Aby mierzyć

napięcie do 200 V, opór R załączony w szereg z amperomierzem musi być tak duży, aby przy prądzie 5 A spadek napięcia na nim wraz ze spadkiem napięcia na oporności przyrządu $R_w = 1 \Omega$ był równy $U = 200 \text{ V}$.

$$U = (R + R_w) \cdot I \quad \text{stad}$$

$$R = \frac{U}{I} - R_w = \frac{200}{5} - 1 = 40 - 1 = 39 \Omega$$

Jeśli więc w szereg z naszym amperomierzem załączymy opór 39Ω , możemy mierzyć nim napięcie do 200 V. Wychyleniom wskazówki na skali 0, 1, 2, 3, 4, 5 A będą odpowiadały napięcia 0, 40, 80, 120, 160, 200 V. Oczywiście woltomierz nasz zrobiony z tak mało czułego przyrządu będzie pobierał prądy odpowiednio wskazywane przez amperomierz, a więc do 5 A. Woltomierz o tak dużym poborze prądu nie będzie miał praktycznego znaczenia, gdyż stanowi za duże dla źródła obciążenie, sam jest odbiornikiem energii.

Korzystniej będzie, jeśli do mierzenia naszego napięcia 200 V użyjemy czułego miliamperomierza, np. którego pełne wychylenie wynosi 5 mA (0,005 A). Podobnie do rozwiązania poprzedniego:

$$U = (R + R_w) \cdot I \quad \text{stad}$$

$$R = \frac{U}{I} - R_w$$

Pominąwszy nieznaczną oporność wewnętrzną przyrządu (R_w) w stosunku do dużej oporności R , jaką będziemy musieli w szereg z nim załączyć, otrzymamy:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{200}{0,005} = 40000 \Omega$$

Przez załączenie więc w szereg z naszym miliamperomierzem oporu 40000Ω będziemy mogli mierzyć napięcia od 0 — 200 V. Wychyleniom wskazówki na skali 0, 1, 2, 3, 4, 5 mA odpowiadać będą napięcia 0, 40, 80, 120, 160, 200 V. Wskazania więc wskazówki na skali w mA należy pomnożyć przez 40 i uważać za odczyt napięcia w woltach. Tak zrobiony woltomierz będzie teraz pobierał przy pełnym wychyleniu zaledwie prąd 5 mA.

Powiększenie zakresu pomiarowego woltomierza. Jeśli mamy woltomierz, którego znany jest opór wewnętrzny, możemy w bardzo łatwy sposób powiększyć jego zakres pomiarowy. Jeśli mianowicie w szereg z woltomierzem załączymy opór równy jego oporności wewnętrznej, wówczas jego zakres pomiarowy powiększy się dwukrotnie czyli wskazania woltomierza należy wówczas mnożyć przez dwa. Jeśli w szereg z woltomierzem załączymy dwa razy większy opór od jego oporności wewnętrznej, wówczas jego zakres pomiarowy zwiększy się trzykrotnie, wskazania jego należy mnożyć przez trzy. Postępując tak dalej wyniknie, że załączenie np. w szereg oporu 9 razy większego od oporu wewnętrznego woltomierza zwiększy jego zakres pomiarowy 10-krotnie.

Pomiar oporności metodą techniczną. Za pomocą amperomierza i woltomierza możemy mierzyć nieznaną nam opory odbiorników energii elektrycznej. Pomiarowy układ połączeń wskazuje rys.

210 lub 211. Nieznany opór R oblicza się z prawa Ohma $R = \frac{U}{I}$,

gdzie napięcie U i prąd I zostają odczytane na woltomierzu i amperomierzu. Taki pomiar nazywa się pomiarem oporności metodą techniczną. Oba te pomiarowe układy połączeń dają pewien błąd. Mianowicie według rys. 210 woltomierz mierzy nie tylko spadek napięcia na oporze R ale i spadek napięcia na oporze wewnętrznym amperomierza. Według zaś rys. 211 amperomierz mierzy nie tylko prąd płynący przez opór R ale i prąd płynący przez woltomierz.

W praktyce układ połączeń rys. 210 stosuje się do pomiaru dużych oporów, gdyż wówczas spadek napięcia na małym oporze wewnętrznym amperomierza nie ma znaczenia w stosunku do spadku napięcia na dużym oporze mierzonym. Układ połączeń rys. 211 stosuje się do pomiaru małych oporów, gdyż wówczas mały prąd płynący przez woltomierz o dużym oporze wewnętrznym jest do pominięcia w stosunku do dużego prądu płynącego przez mały mierzony opór R . Dla oporów o wielkości średniej można przeprowadzić pomiar obu metodami i wziąć wartość średnią z obu pomiarów. Jeśli znane są opory wewnętrzne amperomierza i woltomierza można przy obliczeniu wprowadzić poprawkę — otrzymamy wówczas wyniki ścisłe. Należy mianowicie dla układu rys. 210 od wskazań woltomierza odjąć spadek napięcia na amperomierzu, a dla układu rys. 211 od wskazań amperomierza odjąć prąd płynący przez woltomierz.

Przykład 51.

Przeprowadzono pomiar nieznanego oporu R według układu połączeń rys. 210. Woltomierz wskazał napięcie $U = 100$ V, zaś amperomierz prąd $I = 0,1$ A. Jakiej wielkości jest opór?

$$R = \frac{U}{I} = \frac{100}{0,1} = 1000 \Omega$$

Jaka jest ścisła wartość oporu R , jeśli wiemy, że opór wewnętrzny amperomierza wynosi 1Ω ?

Od wskazań woltomierza należy odjąć spadek napięcia na oporze wewnętrznym amperomierza 1Ω , który przy prądzie $0,1$ A będzie wynosił: $0,1 \cdot 1 = 0,1$ V.

Napięcie więc na mierzonym oporze R będzie w rzeczywistości nie 100 V, które woltomierz wskazuje, a

$$U = 100 - 0,1 = 99,9 \text{ V.}$$

Ścisła więc wartość oporu R będzie:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{99,9}{0,1} = 999 \Omega$$

napięcie do 200 V, opór R załączony w szereg z amperomierzem musi być tak duży, aby przy prądzie 5 A spadek napięcia na nim wraz ze spadkiem napięcia na oporności przyrządu $R_w = 1 \Omega$ był równy $U = 200$ V.

$$U = (R + R_w) \cdot I \quad \text{stad}$$

$$R = \frac{U}{I} - R_w = \frac{200}{5} - 1 = 40 - 1 = 39 \Omega$$

Jeśli więc w szereg z naszym amperomierzem załączymy opór 39Ω , możemy mierzyć nim napięcie do 200 V. Wychyleniom wskazówki na skali 0, 1, 2, 3, 4, 5 A będą odpowiadały napięcia 0, 40, 80, 120, 160, 200 V. Oczywiście woltomierz nasz zrobiony z tak mało czułego przyrządu będzie pobierał prądy odpowiednio wskazywane przez amperomierz, a więc do 5 A. Woltomierz o tak dużym poborze prądu nie będzie miał praktycznego znaczenia, gdyż stanowi za duże dla źródła obciążenie, sam jest odbiornikiem energii.

Korzystniej będzie, jeśli do mierzenia naszego napięcia 200 V użyjemy czułego miliamperomierza, np. którego pełne wychylenie wynosi 5 mA (0,005 A). Podobnie do rozwiązania poprzedniego:

$$U = (R + R_w) \cdot I \quad \text{stad}$$

$$R = \frac{U}{I} - R_w$$

Pominąwszy nieznaczną oporność wewnętrzną przyrządu (R_w) w stosunku do dużej oporności R , jaką będziemy musieli w szereg z nim załączyć, otrzymamy:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{200}{0,005} = 40000 \Omega$$

Przez załączenie więc w szereg z naszym miliamperomierzem oporu 40000Ω będziemy mogli mierzyć napięcia od 0 — 200 V. Wychyleniom wskazówki na skali 0, 1, 2, 3, 4, 5 mA odpowiadać będą napięcia 0, 40, 80, 120, 160, 200 V. Wskazania więc wskazówki na skali w mA należy pomnożyć przez 40 i uważać za odczyt napięcia w woltach. Tak zrobiony woltomierz będzie teraz pobierał przy pełnym wychyleniu zaledwie prąd 5 mA.

Powiększenie zakresu pomiarowego woltomierza. Jeśli mamy woltomierz, którego znany jest opór wewnętrzny, możemy w bardzo łatwy sposób powiększyć jego zakres pomiarowy. Jeśli mianowicie w szereg z woltomierzem załączymy opór równy jego oporności wewnętrznej, wówczas jego zakres pomiarowy powiększy się dwukrotnie czyli wskazania woltomierza należy wówczas mnożyć przez dwa. Jeśli w szereg z woltomierzem załączymy dwa razy większy opór od jego oporności wewnętrznej, wówczas jego zakres pomiarowy zwiększy się trzykrotnie, wskazania jego należy mnożyć przez trzy. Postępując tak dalej wyniknie, że załączenie np. w szereg oporu 9 razy większego od oporu wewnętrznego woltomierza zwiększy jego zakres pomiarowy 10-krotnie.

Pomiar oporności metodą techniczną. Za pomocą amperomierza i woltomierza możemy mierzyć nieznaną nam opór odbiorników energii elektrycznej. Pomiarowy układ połączeń wskazuje rys.

210 lub 211. Nieznany opór R oblicza się z prawa Ohma $R = \frac{U}{I}$,

gdzie napięcie U i prąd I zostają odczytane na woltomierzu i amperomierzu. Taki pomiar nazywa się pomiarem oporności metodą techniczną. Oba te pomiarowe układy połączeń dają pewien błąd. Mianowicie według rys. 210 woltomierz mierzy nie tylko spadek napięcia na oporze R ale i spadek napięcia na oporze wewnętrznym amperomierza. Według zaś rys. 211 amperomierz mierzy nie tylko prąd płynący przez opór R ale i prąd płynący przez woltomierz.

W praktyce układ połączeń rys. 210 stosuje się do pomiaru dużych oporów, gdyż wówczas spadek napięcia na małym oporze wewnętrznym amperomierza nie ma znaczenia w stosunku do spadku napięcia na dużym oporze mierzonym. Układ połączeń rys. 211 stosuje się do pomiaru małych oporów, gdyż wówczas mały prąd płynący przez woltomierz o dużym oporze wewnętrznym jest do pominięcia w stosunku do dużego prądu płynącego przez mały mierzony opór R . Dla oporów o wielkości średniej można przeprowadzić pomiar obu metodami i wziąć wartość średnią z obu pomiarów. Jeśli znane są opory wewnętrzne amperomierza i woltomierza można przy obliczeniu wprowadzić poprawkę — otrzymamy wówczas wyniki ścisłe. Należy mianowicie dla układu rys. 210 od wskazań woltomierza odjąć spadek napięcia na amperomierzu, a dla układu rys. 211 od wskazań amperomierza odjąć prąd płynący przez woltomierz.

Przykład 51.

Przeprowadzono pomiar nieznanego oporu R według układu połączeń rys. 210. Woltomierz wskazał napięcie $U = 100$ V, zaś amperomierz prąd $I = 0,1$ A. Jakiej wielkości jest opór?

$$R = \frac{U}{I} = \frac{100}{0,1} = 1000 \Omega$$

Jaka jest ścisła wartość oporu R , jeśli wiemy, że opór wewnętrzny amperomierza wynosi 1Ω ?

Od wskazań woltomierza należy odjąć spadek napięcia na oporze wewnętrznym amperomierza 1Ω , który przy prądzie $0,1$ A będzie wynosił: $0,1 \cdot 1 = 0,1$ V.

Napięcie więc na mierzonym oporze R będzie w rzeczywistości nie 100 V, które woltomierz wskazuje, a

$$U = 100 - 0,1 = 99,9 \text{ V.}$$

Ścisła więc wartość oporu R będzie:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{99,9}{0,1} = 999 \Omega$$

Przykład 52.

Przeprowadzono pomiar nieznanego oporu R według układu połączeń rys. 211. Woltomierz wskazał napięcie $U = 100$ V, amperomierz prąd $I = 1$ A. Jak duży jest opór R ?

$$R = \frac{U}{I} = \frac{100}{1} = 100 \Omega$$

Jaka jest ścisła wartość oporu R , jeśli opór wewnętrzny woltomierza wynosi 10000Ω ?

Od wskazań amperomierza należy odjąć prąd płynący przez woltomierz, który przy napięciu 100 V i przy oporze wewnętrznym woltomierza 10000Ω wynosi:

$$I_w = \frac{100}{10000} = 0,01 \text{ A.}$$

Prąd więc płynący przez opór R nie będzie w rzeczywistości wskazywanym przez amperomierz jednym amperem, ale:

$$I = 1,0 - 0,01 = 0,99 \text{ A.}$$

Ścisła więc wartość oporu R będzie:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{100}{0,99} = 101 \Omega$$

Z obu przykładów widzimy, że w obu wypadkach błędy wynikłe z nieściśłych pomiarów są bardzo małe.

Pomiar oporności metodą mostkową (Wheatston'a). Dokładny pomiar oporów daje metoda mostkowa (Wheatston'a). Jeśli w układzie połączeń rys. 212, tak dobierzemy wielkości oporów, że prąd w gałęzi C — D nie będzie płynąć, co wykaże nam załączony tam miliamperomierz, wówczas na zasadzie prawa Ohma i prawa Kirchhoffa można dość łatwo wykazać, że między oporami musi istnieć zależność:

$$\frac{R_x}{R_3} = \frac{R_1}{R_2} \text{ czyli } R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_3$$

jeśli znane nam są wartości pomiarowych oporów R_1 R_2 R_3 , wówczas z równania tego łatwo możemy obliczyć nieznaną opór R_x .

Jeden ze sposobów pomiaru oporów metodą mostkową podaje rys. 213. Między punktami A — B jest rozpięty drut oporowy. Wielkość oporu R_3 jest znana. Mierzony opór R_x włączamy pomiędzy punkty A — O. Ruchomy kontakt, do którego dołączony jest miliamperomierz, tak długo przesuujemy po rozpiętym drucie oporowym A — B, aby miliamperomierz nie wykazywał prądu. Zmierzywszy miarką długości drutu oporowego l_1 i l_2 , które są proporcjonalne do ich oporów, na zasadzie poprzedniego wzoru obliczamy nieznaną opór R_x :

$$R_x = \frac{l_1}{l_2} \cdot R_3$$

Omierz. Omierze są to przyrządy do bezpośredniego pomiaru oporów rzeczywistych. Jako źródło napięcia posiadają one wewnątrz zazwyczaj 4,5 V baterijkę lampki kieszonkowej. Mierzony opór łączy się na zewnętrzne zaciski przyrządu. Prąd płynący z baterijki przez opór wykazywany przez przyrząd pomiarowy omierza zależy od wielkości mierzonego oporu. Przyrząd ten wycechowany wprost w omach, zezwala na bezpośredni odczyt wielkości mierzonego oporu. Kombinacja oporów wewnątrz omierza, załączanych specjalnym przełącznikiem, daje kilka zakresów pomiarowych, zezwalając na dość dokładny pomiar oporów począwszy od części oma do paru megomów. Przed pomiarem należy sprawdzić czy przy zwartych zaciskach omierza wskazówka przyrządu stoi na zerze. Jeśli nie, należy odpowiednim pokrętkiem znajdującym się na przyrządzie sprowadzić ją do zera. Gdy wskazówka nie daje się sprowadzić pokrętkiem do zera, jest to oznaką, że baterijka wewnątrz omierza jest wyładowana i należy ją wymienić.

Watomierz. Pomiar mocy. Watomierze są to przyrządy służące do pomiaru mocy pobieranej przez odbiornik energii elektrycznej. Jako watomierzy używa się znanych nam już przyrządów elektrodynamicznych składających się z dwóch cewek, jednej nieruchomej, drugiej ruchomej. Strumienie magnetyczne prądów przepływających przez cewki, oddziaływując na siebie, obracają cewkę ruchomą a wraz z nią przymocowaną do niej wskazówkę. Wielkość wychylenia zależy od wielkości strumieni cewek, a więc od wielkości prądów przez nie przepływających. Przez cewkę nieruchomą watomierza, czyli tzw. prądową, płynie prąd I_1 pobierany przez odbiornik. Cewkę ruchomą, czyli, tzw. napięciową, załączona jest poprzez duży opór szeregowy R na pełne napięcie źródła U (rys. 214). Płynący przez nią nieznaczny prąd I_2 jest proporcjonalny do napięcia U . W ten sposób wychylenia wskazówki przyrządu zamocowanej do cewki ruchomej są z jednej strony proporcjonalne do prądu I_1 pobieranego przez odbiornik, a z drugiej strony do napięcia U na jakie jest on załączony, czyli w rezultacie do mocy pobieranej przez odbiornik. Przyrząd wycechowany jest wprost w watach. Jeśli mierzymy moc prądu zmiennego, to wtedy mogą zaistnieć przesunięcia fazy między prądami I_1 i I_2 . Moment obrotowy cewki ruchomej będzie wtedy zależny od wielkości $\cos \varphi$ przesunięcia fazy między prądami I_1 i I_2 , a ponieważ I_2 jest w fazie z napięciem U , a więc od $\cos \varphi$ przesunięcia fazy między prądem I_1 pobieranym przez odbiornik i napięciem U istniejącym na odbiorniku. Watomierz pokaże więc moc $N = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ czyli moc rzeczywistą pobieraną przez odbiornik, mierzoną w watach.

ROZDZIAŁ XV

PORAŻENIA PRĄDEM ELEKTRYCZNYM

Niebezpiecznym dla życia jest nie napięcie, lecz prąd elektryczny, który przepływa przez ciało ludzkie. Prąd elektryczny zabija. Szczegółowe przyczyny śmierci pod wpływem porażenia prądem elektrycznym nie zostały naukowo dokładnie dotąd wyjaśnione. Stwierdzono jednak, że śmierć następuje na skutek zahamowania działalności serca, czyli na atak sercowy. Szczególnie więc niebezpieczny jest przepływ prądu przez serce, np. przy dotknięciu obu rękami do poszczególnych biegunów źródła prądu, względnie ręką i nogami.

Wielkość prądu, który zabija, nie może być ściśle określona, gdyż w znacznej mierze zależy od wrażliwości poszczególnych ludzi. Już małe prądy rzędu 0,5 A (50 mA) należy uważać za niebezpieczne. Prądy około jednego ampera są już z zasady zawsze śmiertelne. Z liczb tych przy znanej oporności ciała ludzkiego wynika z prawa Ohma napięcie, jakiego należy się wystrzegać. Opór ciała ludzkiego zmienia się w dużych granicach zależnie od stanu powierzchni ciała, do czego dochodzi jeszcze wpływ ubrania. Leży on w granicach 1000 do 100000 Ω i składa się jakby z trzech oporów połączonych w szereg: oporności skóry na miejscu wejścia prądu, wewnętrznej oporności ciała i oporności skóry na miejscu wyjścia prądu. Tylko obie oporności skóry mają znaczenie, wewnętrzny bowiem opór ciała jest nadzwyczaj mały.

Opór skóry zależy od jej stanu, czy jest mokra czy sucha, tłusta lub spocona, dalej od jej grubości oraz wielkości powierzchni styku z przedmiotem będącym pod napięciem.

Im bardziej wilgotna jest skóra, tym mniejszy jest jej opór. Osoby znajdujące się w wodzie przedstawiają bardzo mały opór (100 Ω). Z tego powodu istnieją ostre przepisy o instalacji elektrycznej w łazienkach.

Przyjąwszy za wielkość prądu zabijającego 0,05 A i opór ciała ludzkiego za 1000 Ω okaże się, że już napięcie $U = 0,05 \cdot 1000 = 50$ V należy uważać za niebezpieczne. W każdym bądź razie przy znormalizowanych napięciach jakie mamy w sieciach mieszkaniowych, mianowicie 110 lub 220 Volt, wypadki śmiertelne porażen prądem nie są rzadkie.

We wszystkich wypadkach porażenia prądem elektrycznym jak i porażenia piorunem, należy osoby poszkodowane poddać natychmiast za pomocą sztucznego oddychania i stosować go przez parę godzin, nawet gdyby porażony nie dawał żadnego znaku życia.

S P I S W Z O R Ó W

Oporność przewodu	$R = \rho \cdot \frac{l}{q}$	1
Przewodność	$G = \frac{1}{R}$	2
	$G = \gamma \cdot \frac{q}{l}$	3
Oporność przewodu w zależności od temperatury	$R_{t_2} = R_{20} [1 + a (t_2 - 20)]$	4
Prawo Ohma	$I = \frac{U}{R}$	5
	$U = I \cdot R$	6
	$R = \frac{U}{I}$	7
Oporność zastępcza oporów połączonych szeregowo	$R = R_1 + R_2 + R_3$	8
Oporność zastępcza oporów połączonych równolegle	$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$	9
	$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$	10
Prąd zwarcia	$I_z = \frac{E}{R_w}$	11
II-gie prawo Kirchhoffa	$E_1 + E_2 + E_3 + \dots = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 + \dots + U_1 + U_2 + U_3 + \dots = I (R_{w1} + R_{w2} + R_{w3} + \dots + R_1 + R_2 + R_3 + \dots)$ 12	12
Moc prądu stałego	$N = U \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}$	13
Praca prądu stałego	$A = U \cdot I \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t$	14
Ciepło Joule'a	$Q = 0,24 \cdot I^2 \cdot R \cdot t$	15
Pojemność	$C = \frac{Q}{U}$	16
Pojemność kondensatora płaskiego	$C = \epsilon \cdot \frac{S}{4 \pi d}$	17

Prąd w obwodzie prądu zmiennego, zawierającego tylko cewkę	$I = \frac{U}{\omega L}$	39
Obwód prądu zmiennego, utworzony z szeregowego połączenia oporu i cewki, wartość skuteczna prądu	$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$	40
Przesunięcie fazy	$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R}$	41
Oporność pozorna obwodu	$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$	42
Oporność pojemnościowa	$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$	43
Wartość skuteczna prądu zmiennego w obwodzie posiadającym tylko kondensator	$I = U \cdot \omega C$	44
Obwód prądu zmiennego utworzony z szeregowego połączenia kondensatora i oporu, oporność pozorna	$Z = \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}$	45
Wartość skuteczna prądu	$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 \cdot C^2}}}$	46
Przesunięcie fazy	$\operatorname{tg} \varphi = \frac{-1}{R \cdot \omega C}$	47
Obwód prądu zmiennego utworzony z szeregowego połączenia oporu cewki i kondensatora. Wartość skuteczna prądu	$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$	48
Przesunięcie fazy	$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$	49
Oporność pozorna obwodu	$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$	50
Moc rzeczywista prądu zmiennego	$N_{rz} = U \cdot I \cdot \cos \varphi$	51
Moc urojona prądu zmiennego	$N_u = U \cdot I \cdot \sin \varphi$	52
Moc pozorna prądu zmiennego	$N_p = U \cdot I$	53

Związek między mocą pozorną, rzeczywistą i urojoną	$N_p^2 = N_{rz}^2 + N_u^2$	54
Moc rzeczywista prądu trójfazowego	$N = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi_f =$ $= \sqrt{3} \cdot U_p \cdot I_p \cdot \cos \varphi_f$	55
Straty na histerezę	$N_H = \frac{k_H \cdot f}{100} \left(\frac{B_{max}}{10000} \right)^2 \cdot G$	56
Straty na prądy wirowe	$N_w = k_w \cdot \left(\frac{f \cdot B_{max}}{100 \cdot 10000} \right)^2 \cdot G$	57
Przekładnia transformatora	$\frac{U_1}{U_2} = \frac{z_1}{z_2} = p$	58






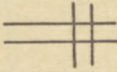

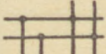

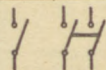


ρ
 γ
 μ
 ε
 π
 ω
 γ
 φ
 φ
 α
 β
 A
 AZ
 az
 B
 C
 d
 E,
 Eér
 Em
 e, u
 Em
 f
 G
 I_p,
 I_f,
 L
 l
 N,









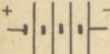

OZNACZENIA LITEROWE STOSOWANE W TEKŚCIE

ρ	.	.	— oporność właściwa
γ	.	.	— przewodność właściwa
μ	.	.	— przenikalność magnetyczna
ϵ	.	.	— stała dielektryczna
π	.	.	— liczba oderwana, równa 3,14
ω	.	.	— pulsacja
η	.	.	— sprawność
Φ	.	.	— strumień magnetyczny
φ	.	.	— przesunięcie fazy
α	.	.	— współczynnik temperatury lub kąt
β	.	.	— kąt
A	.	.	— praca
AZ	.	.	— amperozwoje
az	.	.	— amperozwoje/cm
B	.	.	— indukcja
C	.	.	— pojemność
d	.	.	— średnica
E, U, I,	.	.	— siła elektromotoryczna, napięcie i prąd dla prądu stałego lub ich wartości skuteczne dla prądu zmiennego
$E_{\text{śr}}, U_{\text{śr}}, I_{\text{śr}}$.	.	— wartości średnie siły elektromotorycznej napięcia i prądu dla prądu zmiennego
$E_{\text{max}}, U_{\text{max}}, I_{\text{max}}$.	.	— amplitudy siły elektromotorycznej, napięcia i prądu dla prądu zmiennego
e, u, i	.	.	— wartości chwilowe siły elektromotorycznej, napięcia i prądu zmiennego
E_m	.	.	— siła magnetomotoryczna
f	.	.	— częstotliwość
G	.	.	— przewodność lub ciężar
I_p, U_p	.	.	— prąd i napięcie międzyprzewodowe
I_f, U_f	.	.	— prąd i napięcie fazowe
L	.	.	— indukcyjność
l	.	.	— długość
N, N_{rz}	.	.	— moc prądu stałego lub moc rzeczywista prądu zmiennego

N_p	.	.	— moc pozorna prądu zmiennego
N_u	.	.	— moc urojona prądu zmiennego
n	.	.	— liczba obrotów maszyny elektrycznej lub moc chwilowa
P	.	.	— siła
p	.	.	— przekładnia transformatora lub liczba par biegunów maszyny elektrycznej
Q	.	.	— ładunek elektryczny lub ilość ciepła
q	.	.	— przekrój
R	.	.	— oporność rzeczywista (omowa)
R_w	.	.	— oporność wewnętrzna
R_m	.	.	— oporność magnetyczna
r	.	.	— promień koła
S, s	.	.	— powierzchnia
SEM	.	.	— siła elektromotoryczna
SMM	.	.	— siła magnetomotoryczna
T	.	.	— okres
t	.	.	— czas lub temperatura
Δu	.	.	— wewnętrzny spadek napięcia w źródle energii elektrycznej
Z	.	.	— oporność pozorna
z	.	.	— liczba zwojów
X	.	.	— oporność urojona (bezwatowa)
X_L	.	.	— oporność urojona indukcyjna
X_C	.	.	— oporność urojona pojemnościowa

SCHEMATYCZNE OZNACZENIA STOSOWANE W TEKŚCIE

Oznaczenie	Nazwa	Oznaczenie	Nazwa
	Licznik		Żarówka
	Odbiornik energii elektr		Bezpiecznik
	Opór omowy		Przewody niepołączone, krzyżujące się
	Opór omowy zmienny (regulowany)		Przewody połączone (rozgałęzienia)
	Kondensator		Wyłącznik (jedno lub dwubiegunowy)
	Cewka		Przełącznik

Oznaczenie	Nazwa	Oznaczenie	Nazwa
	Prądnicą (generator) prądu stałego lub zmiennego		Silnik (motor) prądu stałego lub zmiennego
	Prądnicą prądu stałego		Transformator
	Prądnicą prądu zmiennego		Amperomierz
	Ogniwo, element lub akumulator		Woltomierz
	Bateria		Watomierz

JEDNOSTKI ELEKTRYCZNE I ICH OZNACZENIA

Oznaczenie literowe wielkości elektr.	Wielkość elektryczna	Nazwa jednostki	Oznaczenie jednostki w skrócie
Q	Ładunek elektryczny	Coulomb	C
I	Prąd	Amper	A
U	Napięcie	Wolt	V
N	Moc	Wat (Kilowat)	W (KW)
A	Praca	Watosekunda (Kilowatogodzina)	Ws (KWh)
R	Opór	Om	Ω
G	Przewodność	Simens	S
L	Indukcyjność	Henr	H
C	Pojemność	Farad	F
ϕ	Strumień	Maxwell	M
B	Indukcja	Gauss	Gauss

TABLICA I

Oporność właściwa, przewodność właściwa, współczynnik temperatury i ciężar właściwy metali, stopów i innych ciał.

N a z w a	Oporność właściwa ρ mm ² /m przy 20° C	Przewodność właściwa S m/mm ²	Współczynnik temperatury $\alpha \cdot 1000$	Ciężar właściwy gr/cm ³
Srebro (Ag)	0,016	62,5	3,6	10,5
Miedź czysta (Cu)	0,0162	62	4,0	8,89
Miedź na przewody	0,0178	56	3,9	8,89
Aluminium (Al)	0,03	35	4,0	2,7
Wolfram	0,055	18,2	4,1	—
Cynk (Zn)	0,063	15,9	3,8	7,2
Nikel (Ni)	0,1	10	4,0	8,9
Żelazo (Fe)	0,10-0,15	10—6,7	4,5—4,7	7,8
Platyna (Pt)	0,11	9,1	2,0	21,5
Ołów (Pb)	0,2	5,0	3,7	11,4
Nowe srebro (Cu, Ni, Zn)	0,3	3,33	0,25	8,77
Nikelina (Cu, Ni)	0,4	2,5	0,2	8,75
Manganin (Cu, Mn, Ni)	0,42	2,4	0,01	8,4
Reotan (Cu, Ni, Zn)	0,47	2,13	0,23	8,55
Konstantan (Cu, Ni)	0,49	2,05	0,01	8,8
Krupin (Fe, Ni)	0,85	1,18	0,7	8,1
Rtęć (Hg)	0,95	1,05	0,9	13,55
Chromonikel	1,0	1,0	0,15	8,37
Węgiel (C)	10—100	0,1—0,01	-0,2—0,8	2,3—1,9
Ziemia	10 ⁸ - 10 ¹⁰	10 ⁻⁸ — 10 ⁻¹⁰	—	1,34—2,0
Woda destyl. (H ₂ O)	10 ¹⁰	10 ⁻¹⁰	—	1,0(przy)4°C

TABLICA II

Znormalizowane przekroje miedzianych przewodów izolowanych, dozwolone ich obciążenie, nominalne natężenie prądu odpowiedniego bezpiecznika, opór i ciężar przewodów.

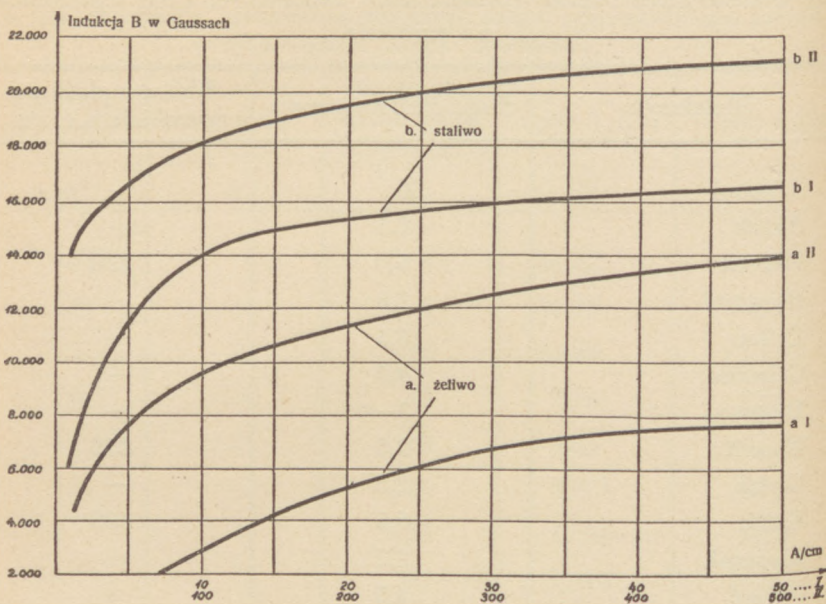
Przekrój przewodu	Dozwolone natężenie prądu	Nominalne natęż. prądu bezpiecznika	Opór 1 Km	Ciężar 1 Km
mm ²	A	A	Ω	Kg
0,75	9	6	23,82	6,66
1,0	11	6	17,86	8,89
1,5	14	10	11,90	13,33
2,5	20	15	7,14	22,2
4	25	20	4,46	35,6
6	31	25	2,975	53,4
10	43	35	1,786	88,9
16	75	60	1,115	142,2
25	100	80	0,714	222
35	125	100	0,510	311
50	160	125	0,357	445
70	200	160	0,255	622
95	240	200	0,188	844
120	280	225	0,1488	1068
150	325	260	0,1190	1333
185	380	300	0,0965	1645
240	450	350	0,0744	2135
300	525	430	0,0595	2668
400	640	500	0,0446	3560
500	760	600	0,0357	4450
625	880	700	0,0286	5550
800	1050	850	0,0223	7110
1000	1250	1000	0,01786	8890

TABLICA III

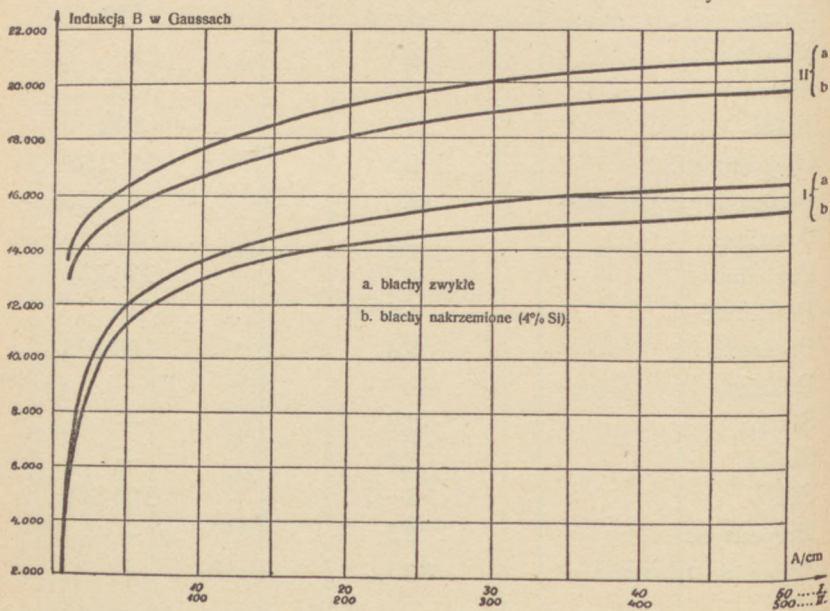
Stałe dielektryczne niektórych materiałów izolacyjnych i ich wytrzymałość na przebicie.

Dielektryk	Stała dielektryczna ϵ	Wytrzymałość na przebicie KV/cm
Alkohol	26	—
Aafult	2,5	—
Bakelit	5,0	230
Bursztyn	2,8	—
Cellon	3,5	—
Celuloid	4,0	—
Drzewo	3—6	—
Ebonit	2,5	350
Guma	2,5	—
Kabit	6,5	400
Kauczuk	2,7	—
Kwarc	4,5	—
Lód	2,5	—
Marmur	8,3	—
Mika	4—8	500
Mikaleks	8,0	—
Mikanit	5,0	300
Nafta	2,1	100
Olej (transf.)	2,3	50-150
Papier impregnowany	3,5	100-150
Parafina	2,1	300
Porcelana	4,7	130-350
Powietrze	1,0006	30
Preszpan	3,4	100-200
Próżnia	1	—
Siarka	2,4	—
Szelak	3,0	—
Szkło	5—7	100-300
Terpentyna	2,3	—
Woda destylowana	80	—

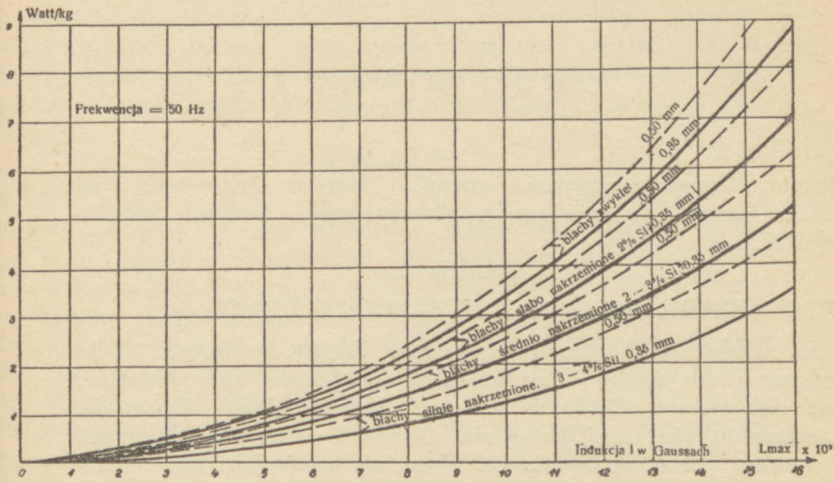
TABLICA IV
Krzywa magnesowania żelaza i staliwa



TABLICA V
Krzywa magnesowania dla blach transformatorowych



TABLICA VI
Całkowite straty dla 1 kg blachy transformatorowej



S P I S R Z E C Z Y

W S T Ę P
Energia. Prawo zachowania energii. Energia elektryczna i jej źródła. Cztery działania prądu elektrycznego. Podział elektrotechniki.

str.
3

Rozdział I

PODSTAWOWE POJĘCIA Z ELEKTROTECHNIKI

7

Atom. Elektron. Elektrony związane. Elektrony wolne. Ciała obojętne elektrycznie. Ciała naładowane ujemnie lub dodatnio. Prąd elektryczny. Coulomb. Amper. Napięcie. Wolt. Oporność. Przewodniki pierwszej kategorii. Oporność właściwa. Oporność przewodów. Ohm. Przewodność. Materiały izolacyjne. Jony. Przewodniki drugiej kategorii. Półprzewodniki. Wpływ temperatury na oporność.

Rozdział II

OBWÓD ELEKTRYCZNY PRĄDU STAŁEGO

15

Źródła prądu elektrycznego. Źródła prądu stałego i prąd stały. Obwód elektryczny. Otwarty i zamknięty obwód elektryczny. Oporność użyteczna i nieużyteczna. Prawo Ohma. Opory łączone szeregowo. Oporność zastępcza oporów połączonych szeregowo. Spadek napięcia. Oporności łączone równoległe. Pierwsze prawo Kirchhoffa. Oporność zastępcza oporów połączonych równoległe. Szeregowo równoległe połączenia oporności. Potencjometr. Oporność wewnętrzna źródła. Wewnętrzny spadek napięcia. Siła elektromotoryczna (SEM). Bieg jałowy. Zwarcie. Szeregowo łączenie źródeł. Drugie prawo Kirchhoffa. Równoległe łączenie źródeł. Moc i praca. Moc prądu stałego (Wat). Moc prądu stałego (KWh). Ciepło Joul'a. Sprawność. Użyteczne i szkodliwe ciepło. Grzejniki elektryczne. Elektryczne oświetlenie żarówkowe. Dopuszczalne obciążenie przewodów. Bezpieczniki topikowe. Spadek napięcia i strata mocy w przewodach. Ciepłne przyrządy pomiarowe.

Rozdział III

ELEKTROSTATYKA

39

Pole elektryczne. Influcja elektryczna. Pojemność. Farad. Kondensator. Równoległe połączenia kondensatorów. Szeregowo połączenia kondensatorów. Ładowanie i wyładowanie kondensatora. Wytrzymałość materiałów izolacyjnych na przebicie. Pojemność przewodów.

Rozdział IV

ZJAWISKA ELEKTROCHEMICZNE

str.

46

Elektroliza. Anoda. Katoda. Elektrolit. Galwanizacja. Galwanoplastyka. Elektrolityczne otrzymywanie czystych metali. Mokre ogniwo elektryczne. Suche ogniwo elektryczne. Akumulator. Ładowanie i wyładowanie akumulatora. Akumulator żelazo-niklowy (Edisona).

Rozdział V

MAGNETYZM

51

Magnes naturalny. Bieguny magnesu. Magnetyzm ziemski. Kompas. Przyciąganie się magnesów. Magnesowanie. Linie sił. Pole magnetyczne. Żelazo i stal w polu magnetycznym. Ciała ferromagnetyczne. Magnesowanie się żelaza a magnesowanie się stali. Ciała paramagnetyczne. Ciała diamagnetyczne. Magnesowanie stożków. Rozmagnesowywanie. Pole magnetyczne przewodnika z prądem. Reguła śruby prawoskrętnej. Mechaniczne oddziaływanie na siebie dwóch przewodów z prądem. Elektromagnes. Fabrykacja magnesów. Magnetyzm szczątkowy. Dzwonek elektryczny. Przekaznik elektryczny. Aparat telegraficzny Morse'a. Elektromagnetyczne przyrządy pomiarowe. Strumień magnetyczny (Maxwell). Indukcja magnetyczna (Gauss). Współczynnik przenikalności magnetycznej. Oporność magnetyczna. Amperozwoje. Siła magneto-motoryczna (SMM). Obliczanie amperozwojów. Krzywa magnesowania. Siła przyciągania magnesu. Średnia droga strumienia. Rozproszenie. Działanie pola magnesu na przewód z prądem. Reguła lewej ręki. Obrót cewki z prądem w polu magnetycznym. Zasada silnika elektrycznego. Magnetoelektryczne przyrządy pomiarowe. Elektrodynamiczne przyrządy pomiarowe.

Rozdział VI

ZMIENNOŚĆ WIELKOŚCI ELEKTRYCZNYCH W CZASIE.
NAPIĘCIE I PRĄD ZMIENNY

66

Zmiana skokami prądu i napięcia przy przerywaniu obwodu. Zmiana ciągła prądu na skutek zmiany oporności. Zmiana prądu i spadku napięcia na skutek zmiany napięcia zasilającego. Prąd i napięcie zmienne. Pole magnetyczne zmienne.

Rozdział VII

INDUKCJA

71

SEM indukowana przy ruchu przewodów w polu magnetycznym. Reguła prawej ręki. Zasada prądnic elektrycznej. SEM indukowana w zwoju obejmującym zmienny strumień magnetyczny. Współczynnik indukcyjności własnej SEM-indukcji. Prąd samoindukcji. Oporność indukcyjna. Indukcyjność cewki. Indukcyjność przewodów.

Rozdział VIII

PRĄD ZMIENNY 77

Określenie napięcia i prądu stałego. Napięcie i prąd zmienny. Szybkość kątowna. Powstawanie napięcia zmiennego. Prąd i napięcie sinusoidalne. Wykres wektorowy. Wykres czasowy. Prądy niesinusoidalne. Okres. Pulsacja. Częstotliwość. Amplituda. Wartość chwilowa. Wartość średnia. Wartość skuteczna. Przesunięcie fazy (φ). Oporność rzeczywista w obwodzie prądu zmiennego. Cewka w obwodzie prądu zmiennego. Cewka i oporność połączone szeregowo w obwodzie prądu zmiennego. Cewka z uwzględnieniem oporności omowej. Kondensator w obwodzie prądu zmiennego. Kondensator i oporność szeregowo połączone w obwodzie prądu zmiennego. Kondensator, cewka i oporność połączone w szereg. Rezonans napięć. Przepięcie. Rezonans prądów. Przetężenie. Praca i moc prądu zmiennego. Oporność bezwzględna, urojona. Moc rzeczywista, pozorna, urojona. Prąd trójfazowy. Trójfazowy układ gwiazdy. Trójfazowy układ trójkąta.

Rozdział IX

STRATY W ŻELAZIE 109

Histeresa. Prądy wirowe. Zasada indukcyjnego licznika energii elektrycznej prądu zmiennego. Całkowite straty w żelazie.

Rozdział X

TRANSFORMATORY 115

Zasada transformatorów. Bieg jałowy transformatora. Przekładnia transformatora. Transformator obciążony. Straty w transformatorze. Dopuszczalny prąd obciążenia. Dopuszczalne napięcie strony pierwotnej. Sprawność transformatora. Autotransformator. Transformator wielouziwojeniowy. Transformator trójfazowy. Budowa transformatorów. Transformator olejowy.

Rozdział XI

MASZYNY ELEKTRYCZNE 122

Prądownica prądu zmiennego. Prądnica prądu stałego. Komutator. Wzbudzenie prądnicy prądu stałego. Prądnica bocznikowa, szeregowo, szeregowo-bocznikowa. Silniki elektryczne. Silnik synchroniczny prądu zmiennego. Silnik prądu stałego. Silnik bocznikowy, szeregowy, szeregowo-bocznikowy. Rozruch silników. Oporniki rozruchowe. Silniki asynchroniczne trójfazowe. Poślizg. Silniki klatkowe. Rozruch. Silniki dwuklatkowe. Silnik pierścieniowy. Silniki komutatorowe prądu zmiennego.

IV

Rozdział XII

	str.
WYŁADOWANIA W GAZACH I PRÓŻNI	130
Jonizacja lawinowa. Lampki neonowe (neonówki). Reklamy neonowe. Przepływ elektronów w próżni. Łuk elektryczny. Lampy łukowe. Władowania atmosferyczne.	

Rozdział XIII

TERMOELEKTRYCZNOŚĆ	134
------------------------------	-----

Rozdział XIV

POMIARY ELEKTRYCZNE	135
-------------------------------	-----

Zestawienie elektrycznych przyrządów pomiarowych Amperomierz. Pomiar natężenia prądu. Zmiana zakresu pomiarowego amperomierza. Woltomierz. Pomiar napięcia. Amperomierz z szeregowym oporem jako woltomierz. Powiększenie zakresu pomiarowego woltomierza. Pomiar oporności metodą techniczną. Pomiar oporności metodą mostkową (Wheatstone'a). Omomierz. Woltomierz. Pomiar mocy.

Rozdział XV

PORAŻENIA PRĄDEM ELEKTRYCZNYM	142
Spis wzorów	143
Oznaczenia literowe stosowane w tekście	147
Schematyczne oznaczenia stosowane w tekście	149
Jednostki elektryczne i ich oznaczenia	150
Tablica I, II, III, IV, V, VI	151-155
Spis rzeczy	I—IV



10,

Biblioteka Główna UMK



300000119941 ✓

B1. Fad

PODRECZNIKI DLA

JER

P
ELEK

Z B

W
Z
C
S
I

BOWI OZDROWIENCOW

BIBLIOTEKA ŻOŁNIERSKA
PODRECZNIKI DLA DOKSZTAŁCAJĄCYCH SZKÓŁ ZAWODOWYCH
NR 8

DOM OZDROWIENCOW

JERZY BORKOWSKI I JERZY BUCZKIEWICZ

PODSTAWY ELEKTROTECHNIKI

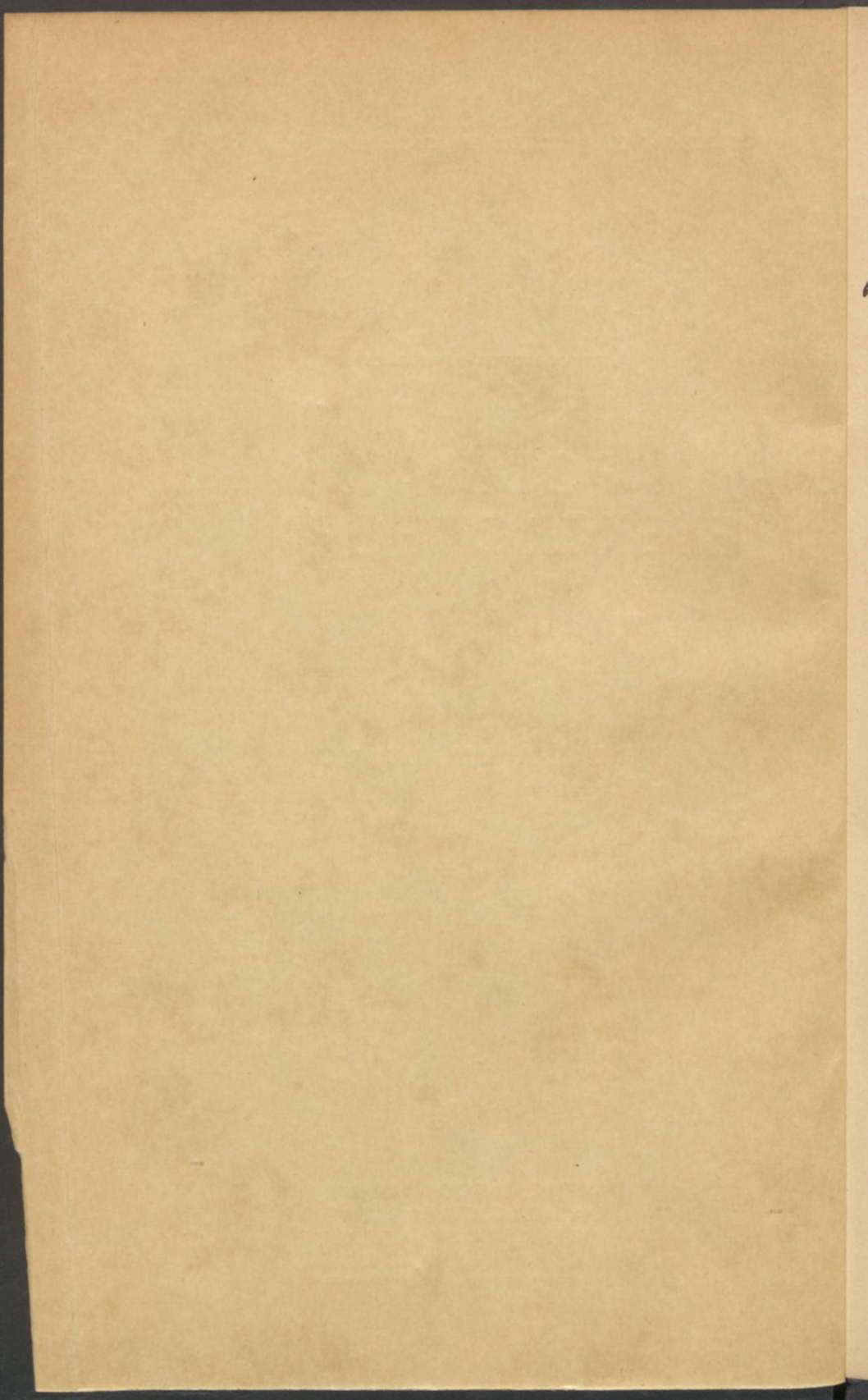
Wydanie drugie

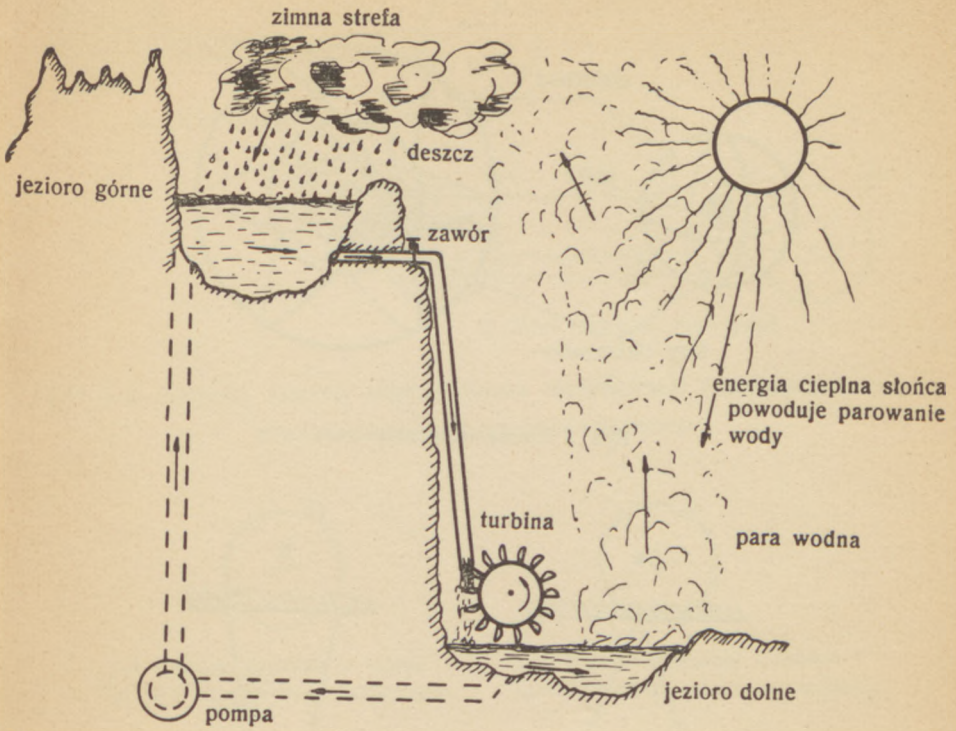
ZBIÓR RYSUNKÓW

DOM OZDROWIENCOW

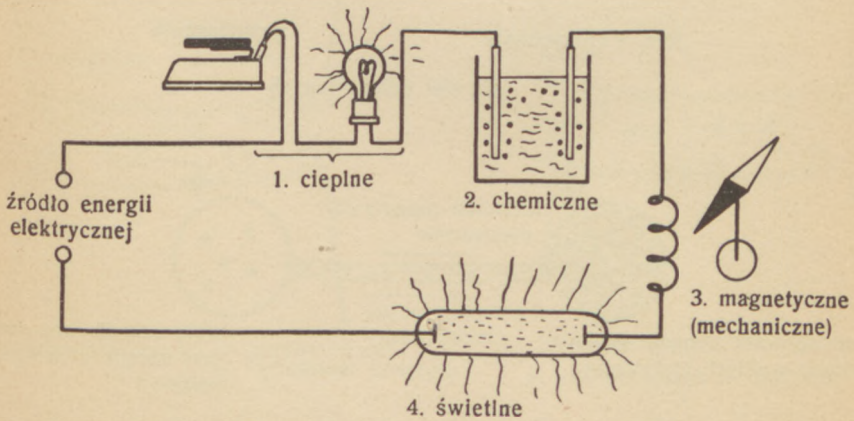


WSZECHŚWIATOWY KOMITET
ZWIĄZKÓW MŁODZIEŻY
CHRZEŚCIJAŃSKIEJ W GENEWIE
S Z W A J C A R I A

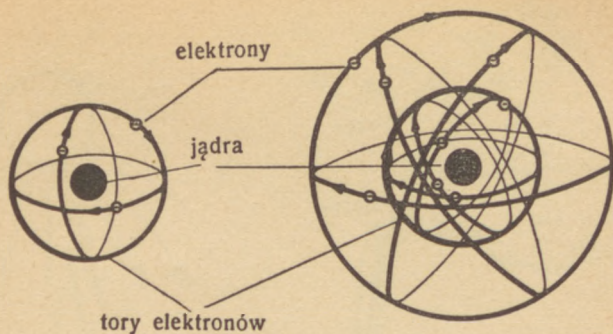




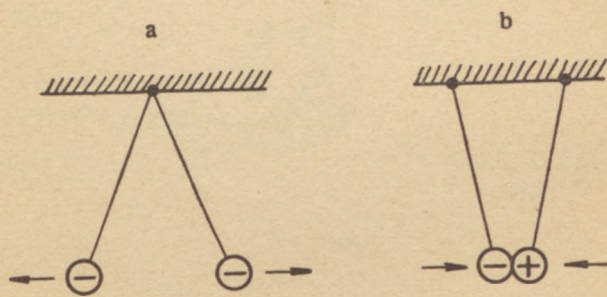
Rys. 1



Rys. 2 Cztery działania prądu elektrycznego



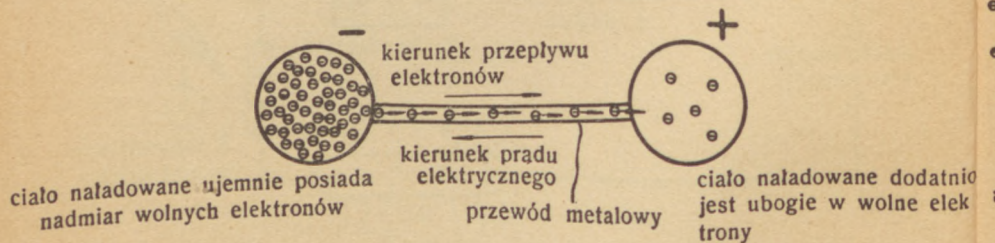
Rys. 3 Atomy (schematycznie)



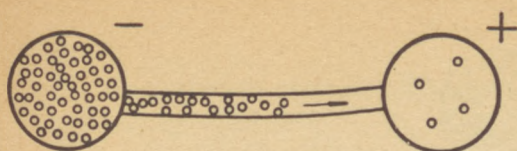
Rys. 4 Odpychanie

przyciąganie

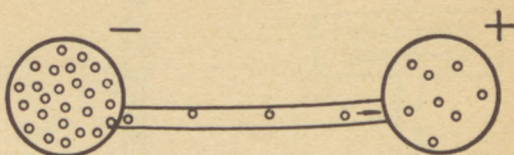
się ciał naładowanych



Rys. 5. Przepływ prądu elektrycznego między dwoma różnoimiennie naładowanymi ciałami



a. Duże napięcie, duży prąd



b. Małe napięcie, mały prąd

Rys. 6 O wielkości napięcia między dwoma różnoimiennie naładowanymi ciałami stanowi różnica w zawartości elektronów

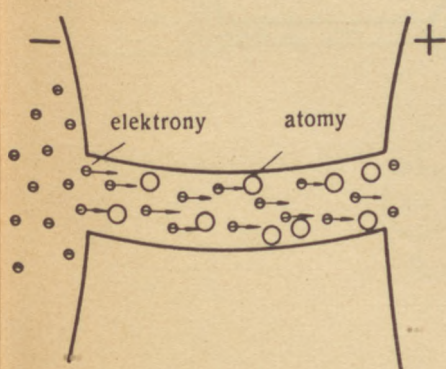


Jon ujemny powstały z atomu skutkiem dodatkowego elektronu

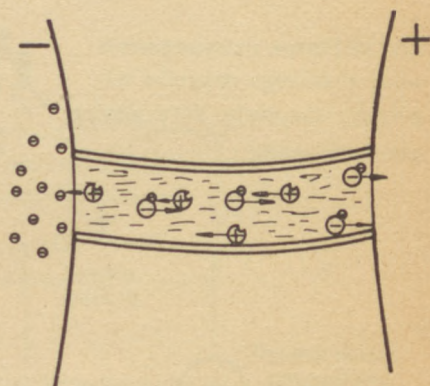


Jon dodatni powstały z atomu skutkiem utraty elektronu wolnego

Rys. 7 Jony

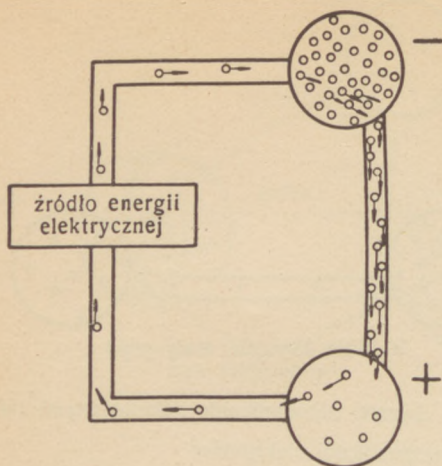


a. Przepływ elektronów w przewodnikach I kategorii



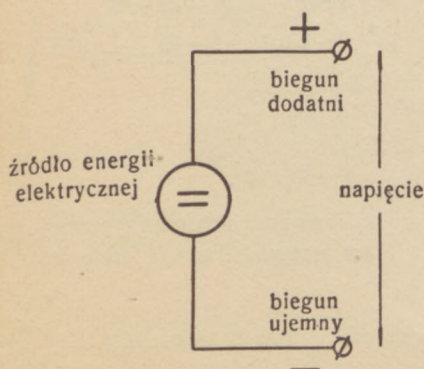
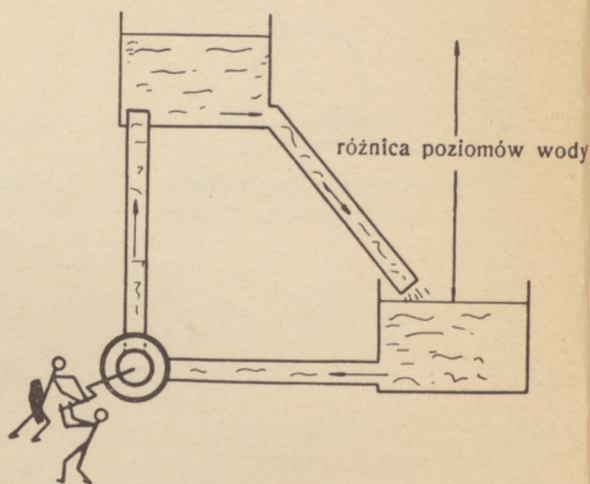
b. Transport elektronów przez jony w przewodnikach II kategorii

Rys. 8 Przepływ prądu w przewodnikach I oraz II kategorii

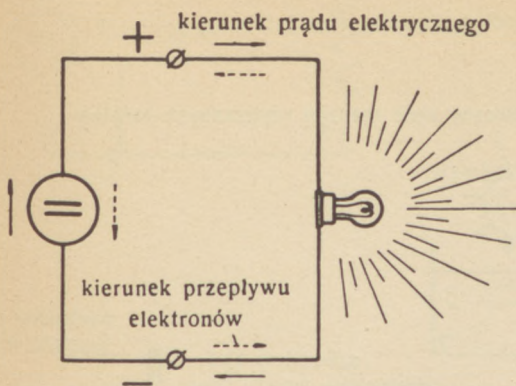


Rys. 9 Źródło energii elektrycznej odprowadza elektrony z (+) i do prowadzi do (-) utrzymując stałą różnicę gęstości elektronów w obu ciałach (stałe napięcie)

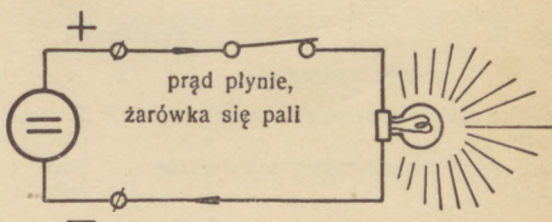
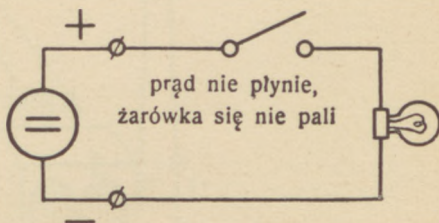
Rys. 10 Pompa przepompowuje wodę z dolnego zbiornika do górnego utrzymując stałą różnicę poziomów wody



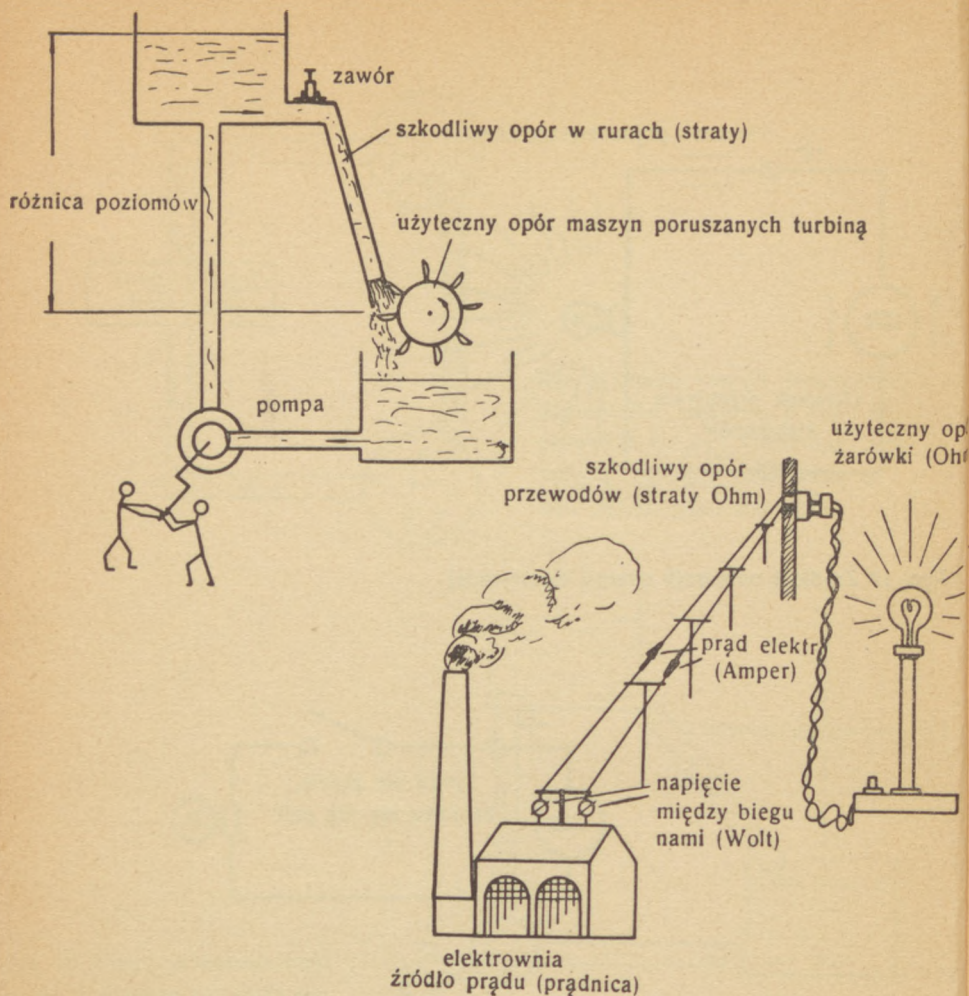
Rys. 11 Źródło energii elektrycznej



Rys 12 Źródło i odbiornik energii elektrycznej



Rys. 13 Otwarty i zamknięty obwód elektryczny



Rys. 14

Porównanie

obiegu wodnego

z

obwodem elektrycznym

Różnica poziomów stanowi o przepływie wody.

Napięcie stanowi o przepływie prądu elektrycznego.

Ilość wody przepływająca w jednostce czasu

Ilość elektronów przepływających w jednostce czasu (prąd elektryczny).

Energia doprowadzona:

Praca przepompowania wody dla utrzymania różnicy poziomów.

Praca maszyn napędzających prądnicę w elektrowni dla utrzymania napięcia.

Zużycie energii:

Pokonanie oporu w rurach.

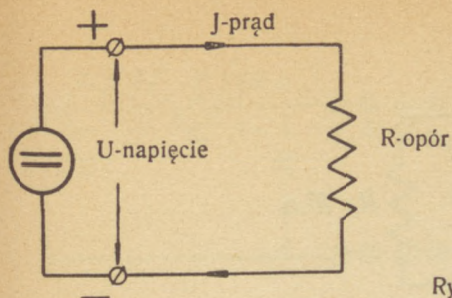
Pokonanie oporu w przewodach.

Użyteczna praca wykonywana przez maszyny napędzane turbiną.

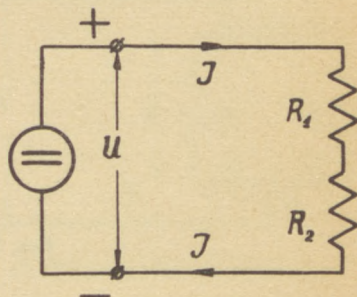
Użyteczna praca prądu elektrycznego na oporze żarówki przekształca się w energię ciepłą (światłą).

Zawór.

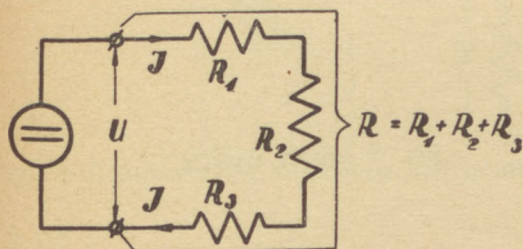
Wyłącznik.



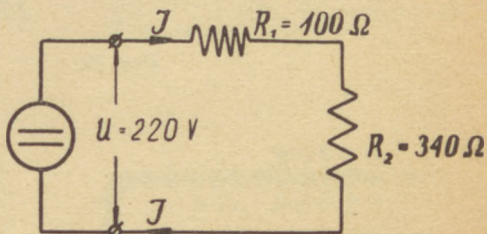
Rys. 15



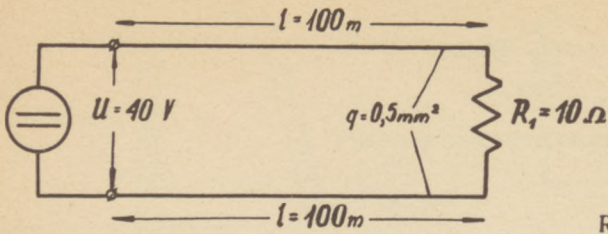
Rys. 16 Szeregowe połączenie oporów



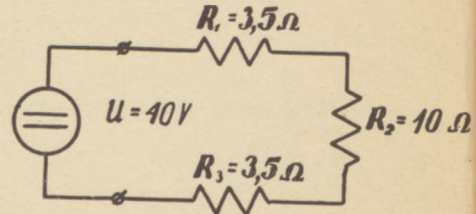
Rys. 17 Szeregowe połączenie oporów. Oporność zastępcza całkowita, równa się sumie oporności.



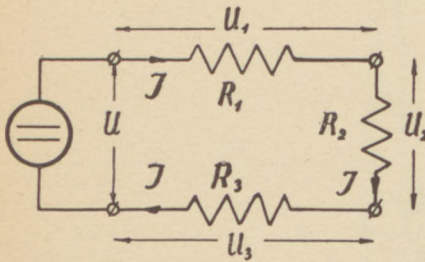
Rys. 18



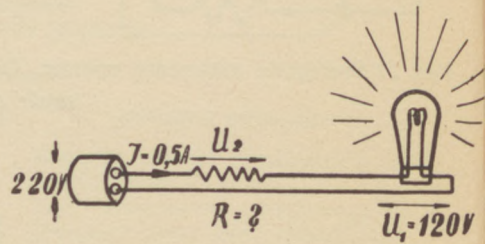
Rys. 19



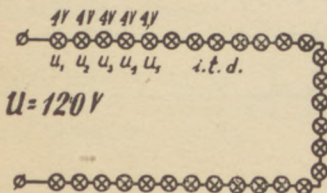
Rys. 20



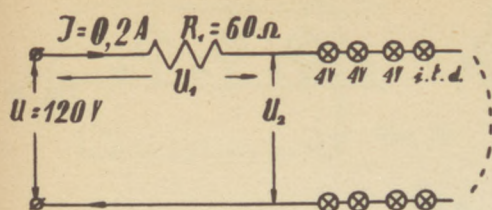
Rys. 21 Spadek napięcia



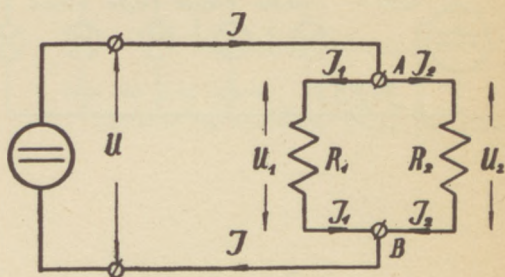
Rys. 22



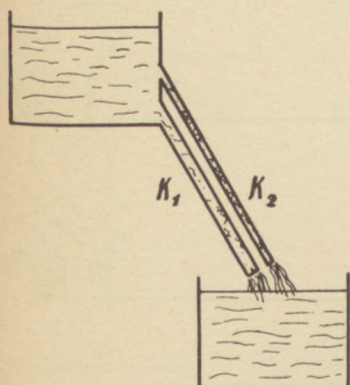
Rys. 23



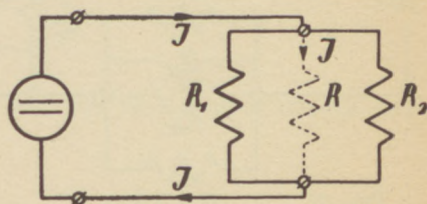
Rys. 24



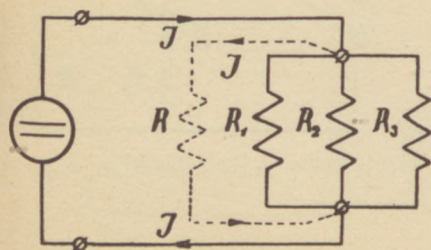
Rys. 25 Opory połączone równolegle



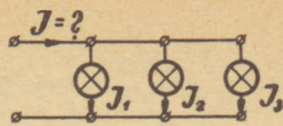
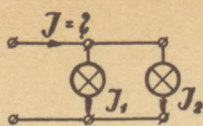
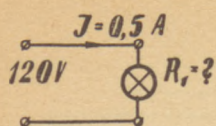
Rys. 26 Dodatkowa rura K_2 zwiększa ilość przepływającej wody



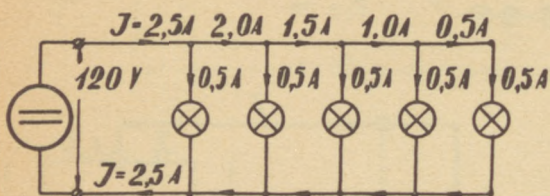
Rys. 27



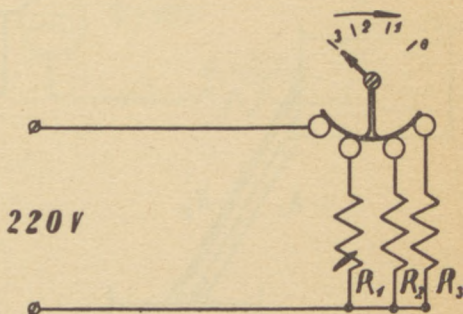
Rys. 28



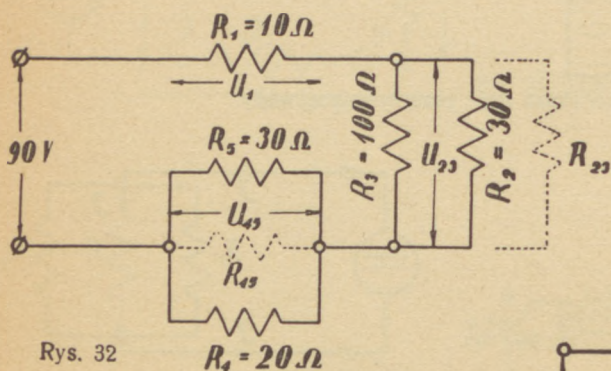
Rys. 29



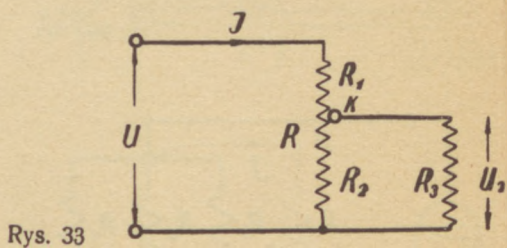
Rys. 30



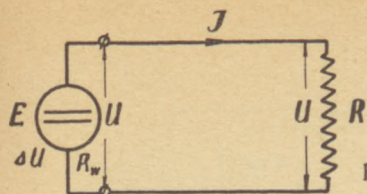
Rys. 31



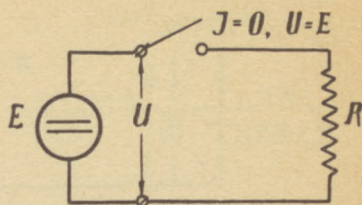
Rys. 32



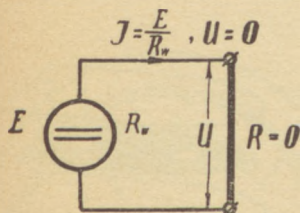
Rys. 33



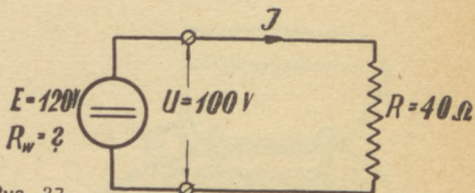
Rys. 34



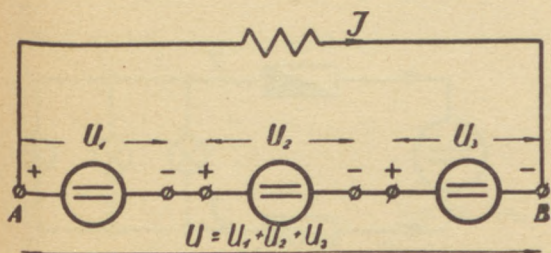
Rys. 35 Bieg jałowy:
Napięcie na zaciskach równe jest SEM



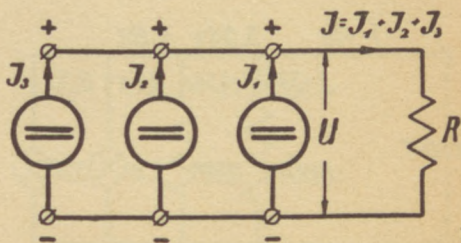
Rys. 36 Zwarcie:
Napięcie na zaciskach równe jest zeru



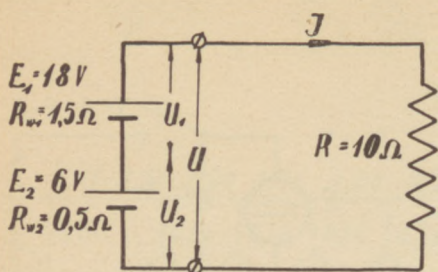
Rys. 37



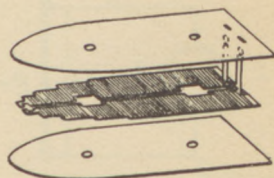
Rys. 38 Szeregowe łączenie źródeł



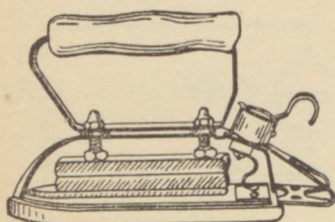
Rys. 39 Równoległe łączenie źródeł



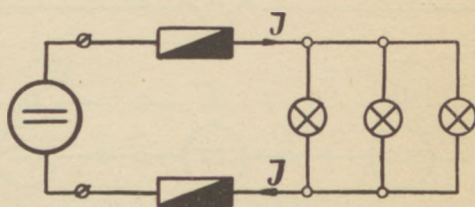
Rys. 40



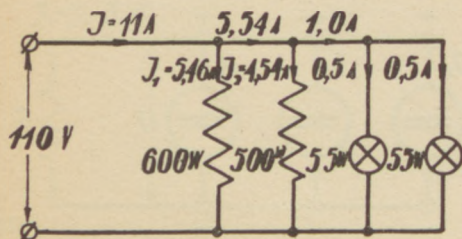
Rys. 41 Grzejnik żelazka elektrycznego



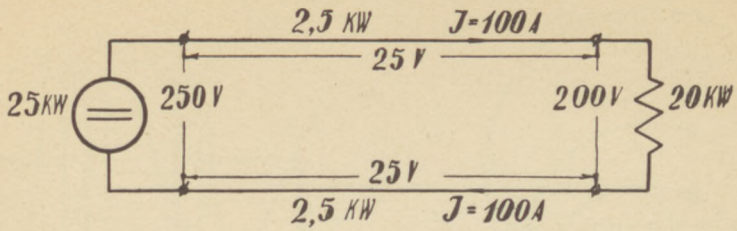
Rys. 42 Żelazko elektryczne



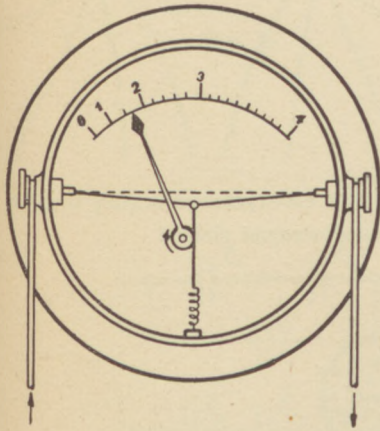
Rys. 43 Bezpieczniki zabezpieczają przewody przed nadmiernym ich obciążeniem



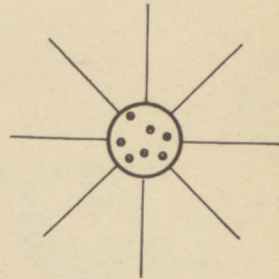
Rys. 44



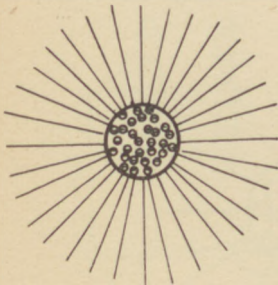
Rys. 45



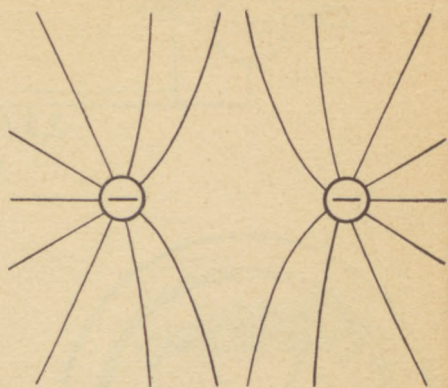
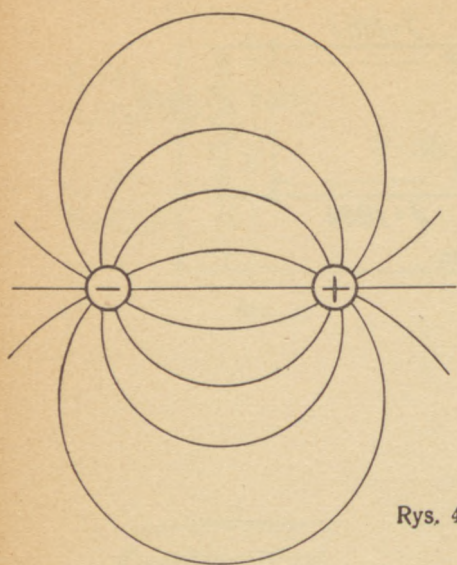
Rys. 46 Amperomierz cieplikowy



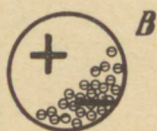
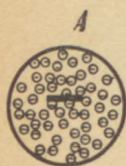
Rys. 47 Pole elektryczne. Mniejsze natężenie pola



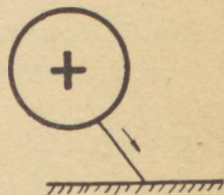
Rys. 48 Pole elektryczne. Większe natężenie pola



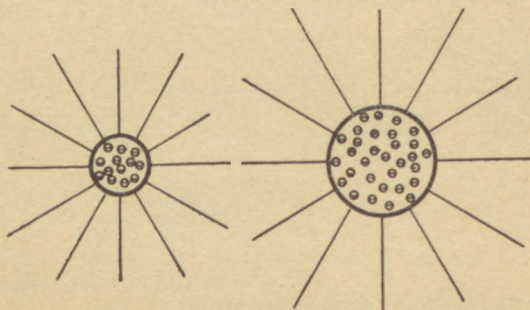
Rys. 49 Linie sił pola elektrycznego między dwoma naładowanymi ciałami



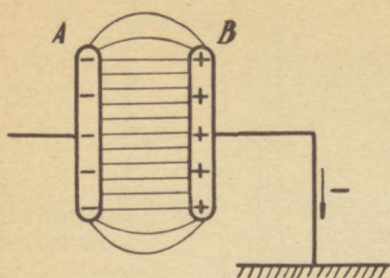
Rys. 50 Influcja elektryczna



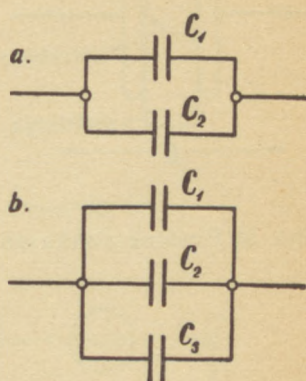
Rys. 51 Influcja elektryczna



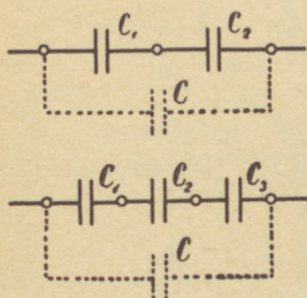
Rys. 52



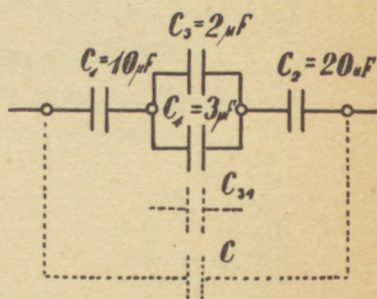
Rys. 53



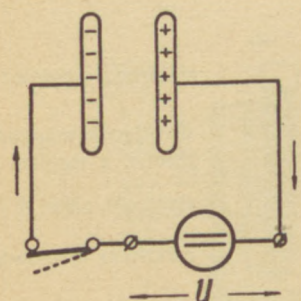
Rys. 54 Równoległe połączenie kondensatorów



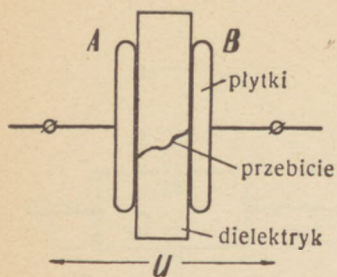
Rys. 55 Szeregowe połączenie kondensatorów



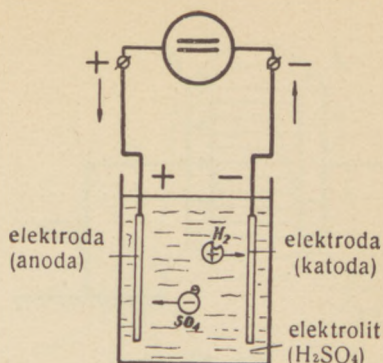
Rys. 56



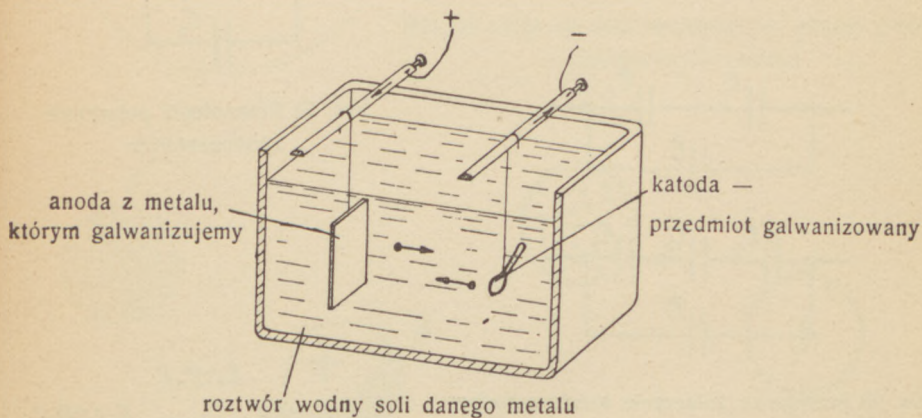
Rys. 57 Ładowanie kondensatora



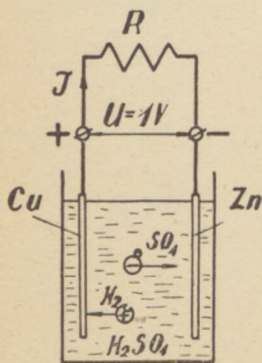
Rys. 58 Przebicie dielektryka



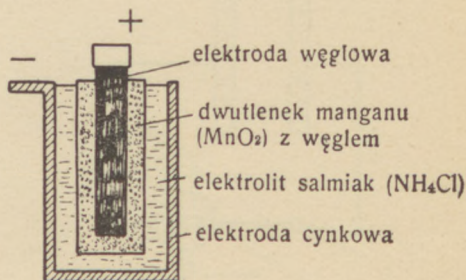
Rys. 59 Elektroliza



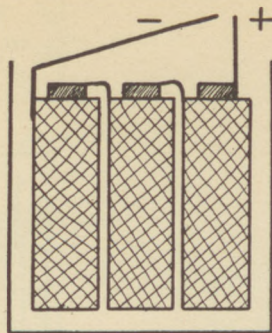
Rys. 60 Galwanizacja



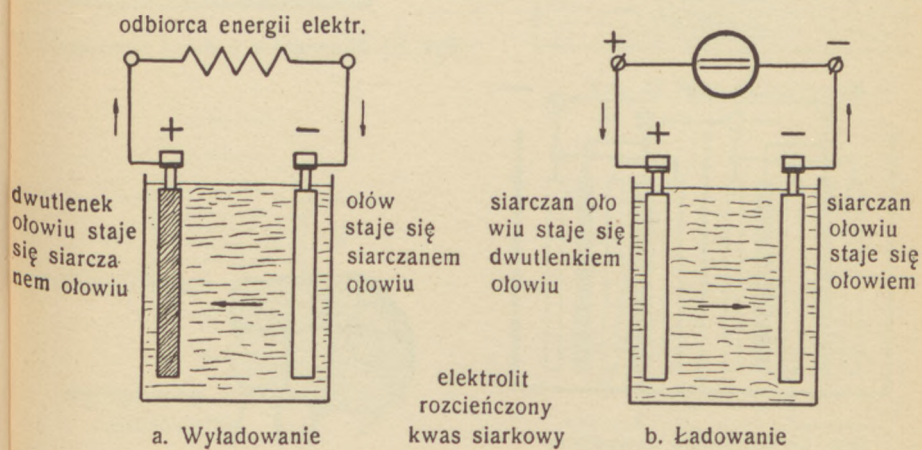
Rys. 61 Mokre ogniwo elektryczne



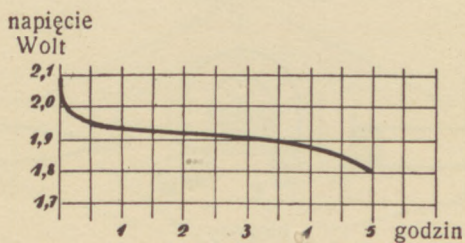
Rys. 62 Suche ogniwo elektryczne



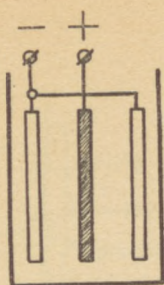
Rys. 63 Plaska bateria lampki kieszonkowej 4,5 V



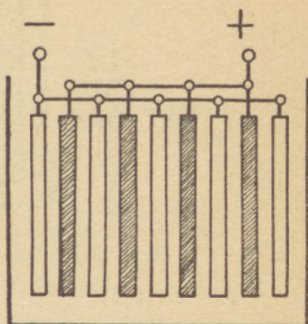
Rys. 64 Wyladowanie i ładowanie akumulatora



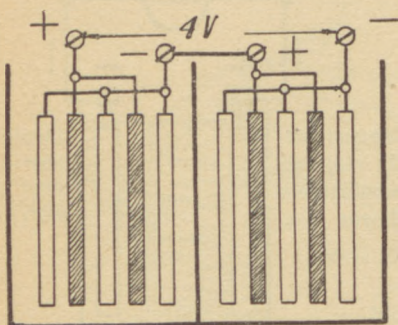
Rys. 65 Krzywa wyladowania akumulatora



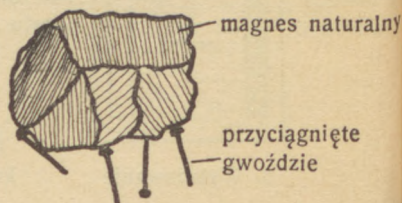
Rys. 66



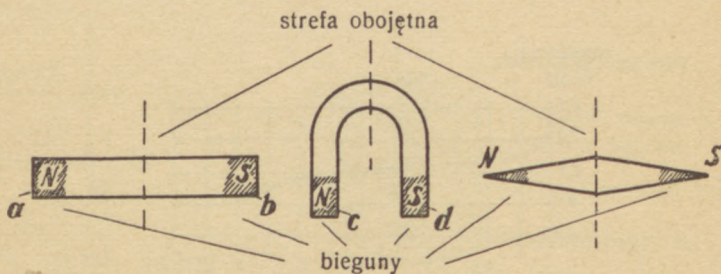
Rys. 67 Akumulator o dużej pojemności



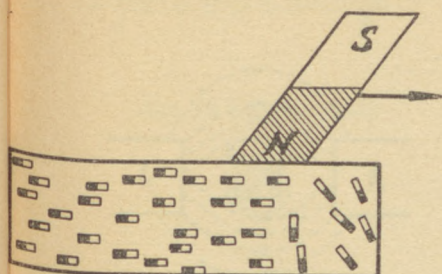
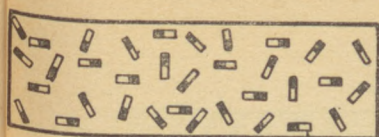
Rys. 68 4-woltowy akumulator



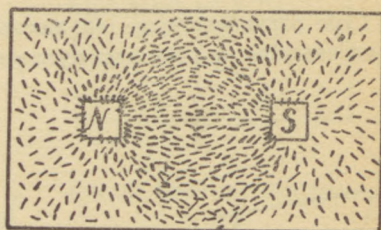
Rys. 69 Magnes naturalny



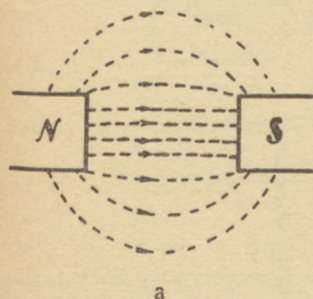
Rys. 70 Magnesy sztuczne: sztabki, podkowa, igła magnetyczna



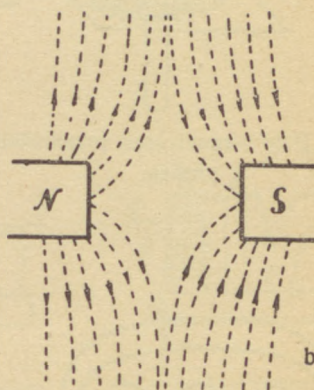
Rys. 71 Magnesowanie stali



Rys. 72 Pole magnetyczne

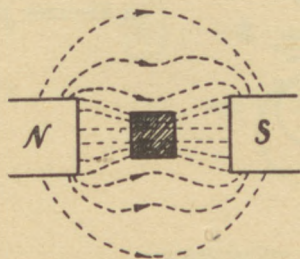


a

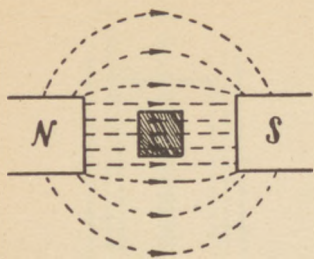


b

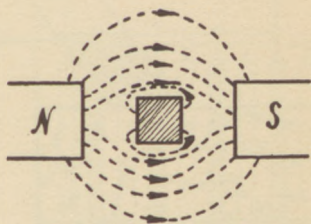
Rys. 73 Pole magnetyczne magnesów skierowanych do siebie różnoimiennymi oraz jednoimiennymi biegunami



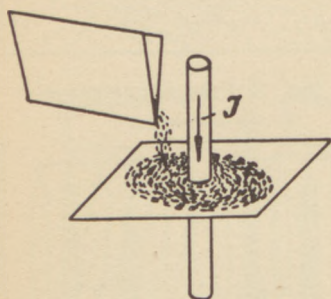
Rys. 74 Ciało ferromagnetyczne (np. stal) umieszczone w polu magnetycznym



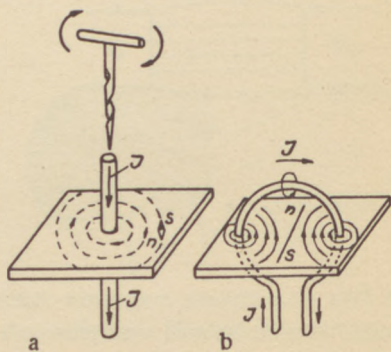
Rys. 75 Ciało paramagnetyczne (np. aluminium) umieszczone w polu magnetycznym



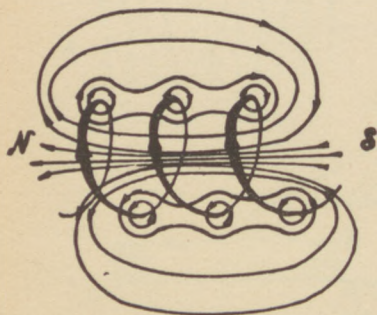
Rys. 76 Ciało diamagnetyczne (np. miedź) umieszczone w polu magnetycznym



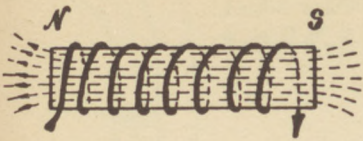
Rys. 77 Pole magnetyczne przewodnika z prądem



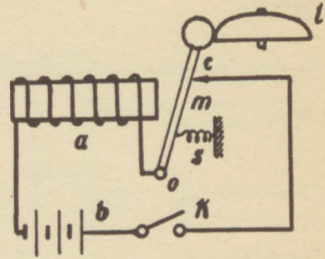
Rys. 78 Kierunek pola magnetycznego a kierunek prądu (reguła śruby prawo skrętnej)



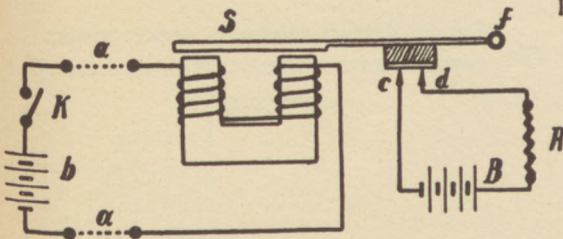
Rys. 79 Pole magnetyczne cewki cylindrycznej



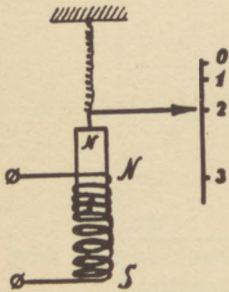
Rys. 80 Elektromagnes



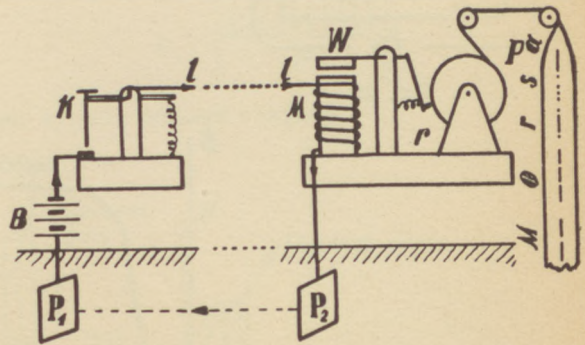
Rys. 81 Dzwonek elektryczny



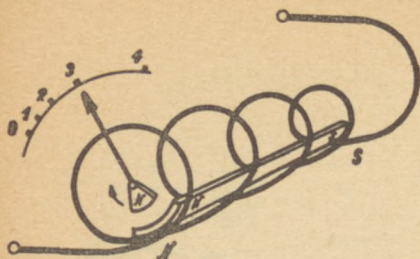
Rys. 82 Przekaznik elektryczny



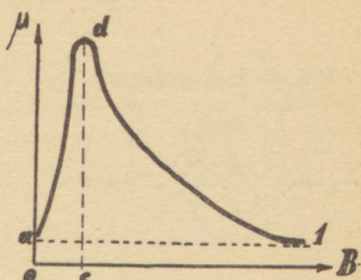
Rys. 84 Przyrząd elektromagnetyczny z wciągającym rdzeniem



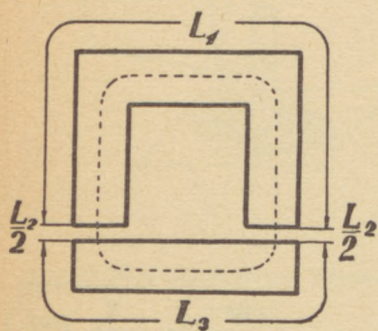
Rys. 83 Aparat telegraficzny Morse'a



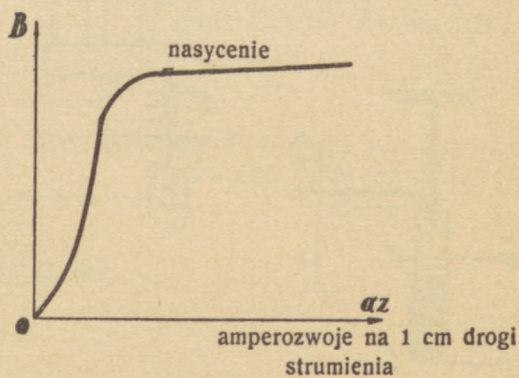
Rys. 85 Prząd elektromagnetyczny z obracającym rdzeniem



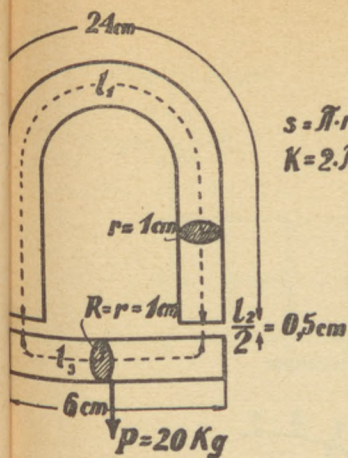
Rys. 86 Krzywa zależności współczynnika przenikalności magnetycznej μ od indukcji magnetycznej B



Rys. 87



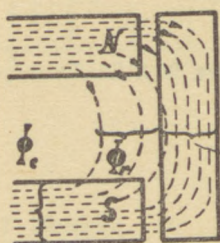
Rys. 88 Krzywa magnesowania



$$s = \pi \cdot r^2 = 3,14 \cdot 1^2 = 3,14$$

$$K = 2 \cdot \pi \cdot r^2 = 2 \cdot 3,14 \cdot 1^2 = 6,28$$

Rys. 89



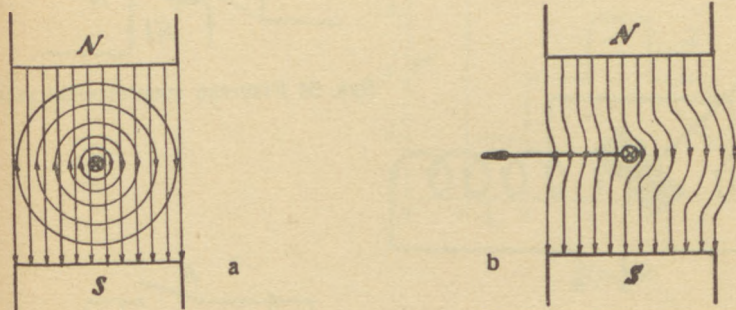
$$\Phi_c = \Phi_u + \Phi_r$$

Φ_c - strumień całkowity

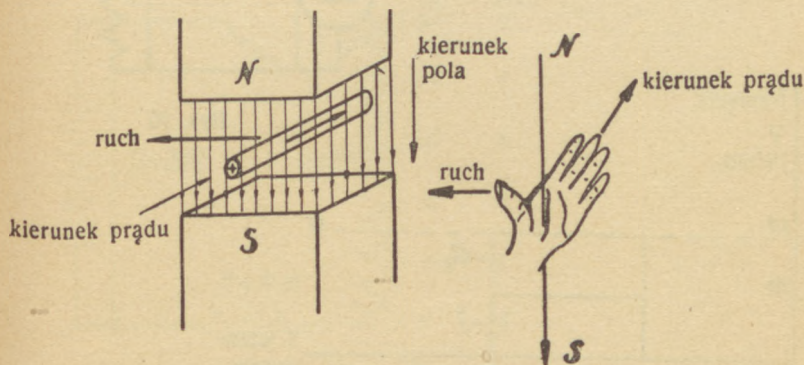
Φ_u - strumień użyteczny

Φ_r - strumień rozproszenia

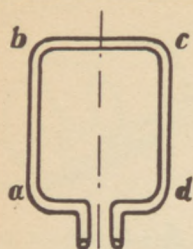
Rys. 90 Strumień rozproszenia



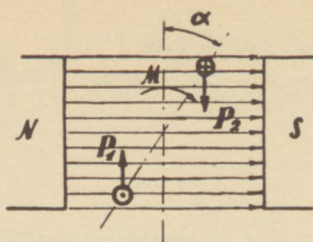
Rys. 91 Pole magnesu wypycha przewód z prądem



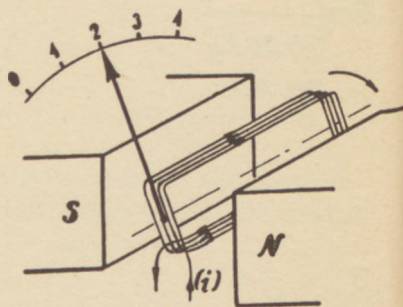
Rys. 92 Reguła lewej ręki



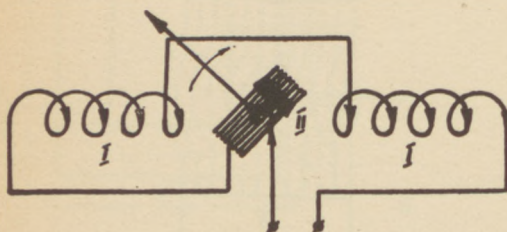
Rys. 93 a Ramka



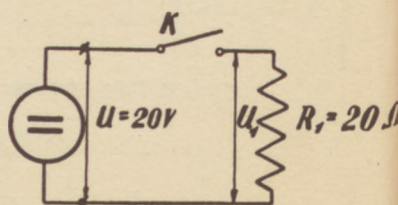
Rys. 93 b Ramka w polu magnetycznym



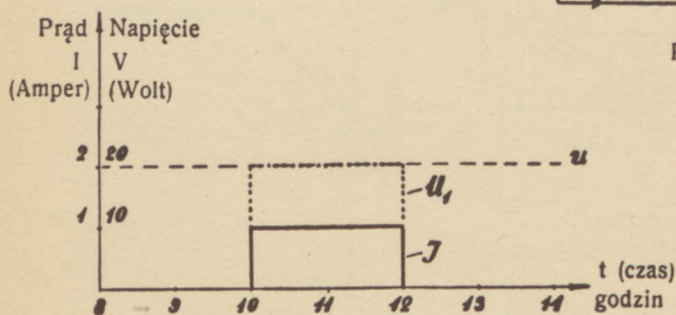
Rys. 94 Przyrząd magnetoelektryczny



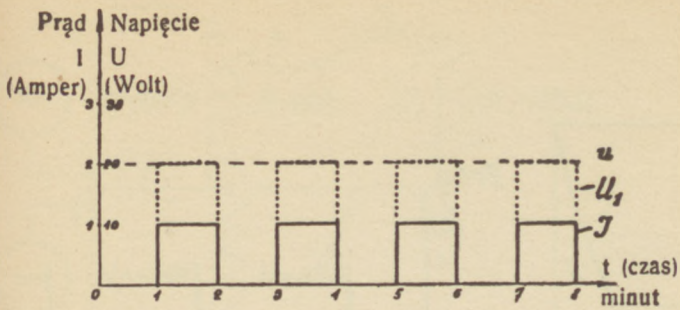
Rys. 95 Przyrząd elektrodynamiczny



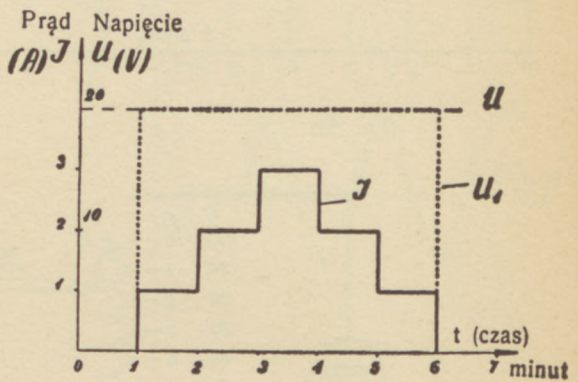
Rys. 96



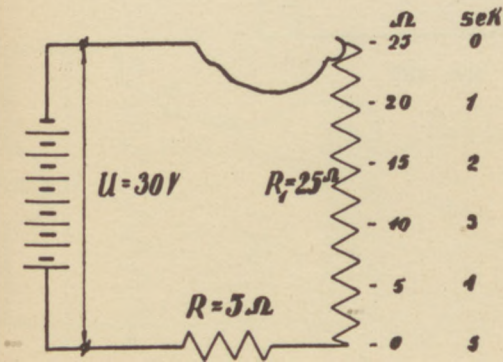
Rys. 97



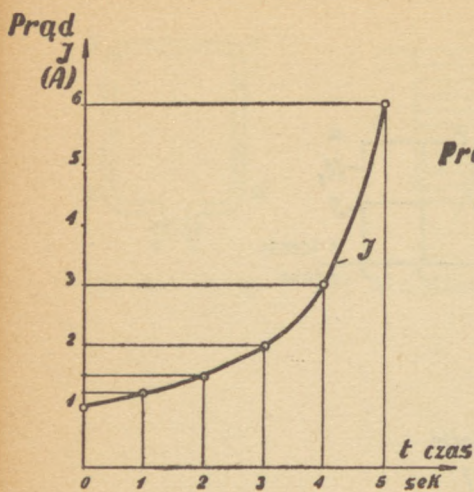
Rys. 98



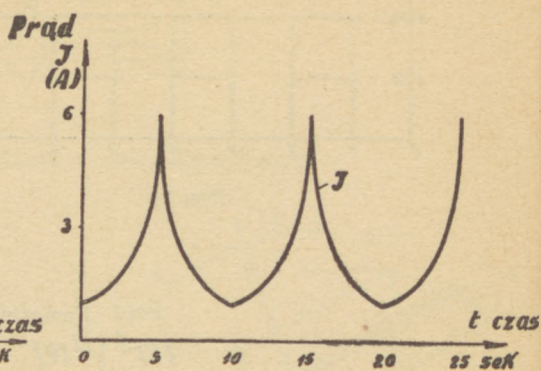
Rys. 99



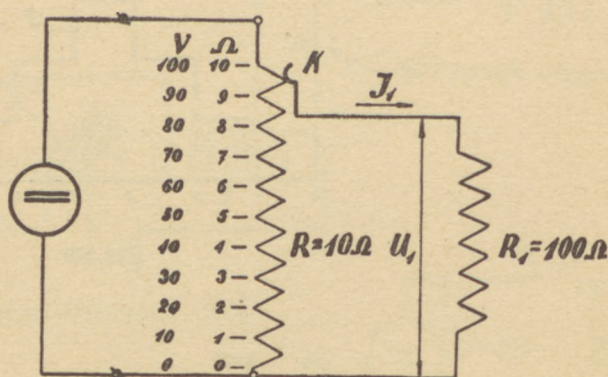
Rys. 100



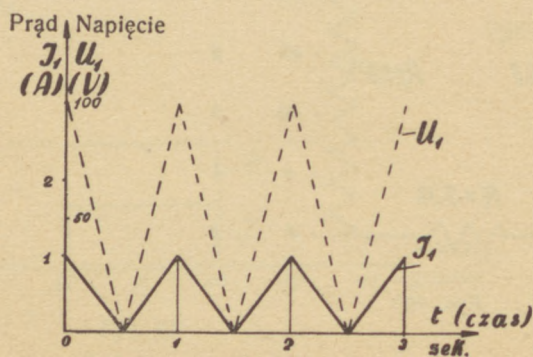
Rys. 101



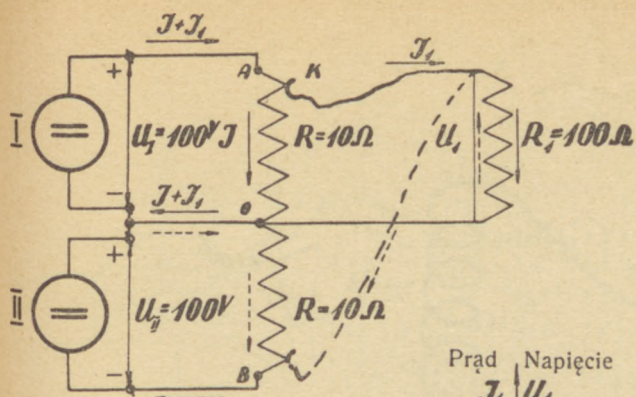
Rys. 102



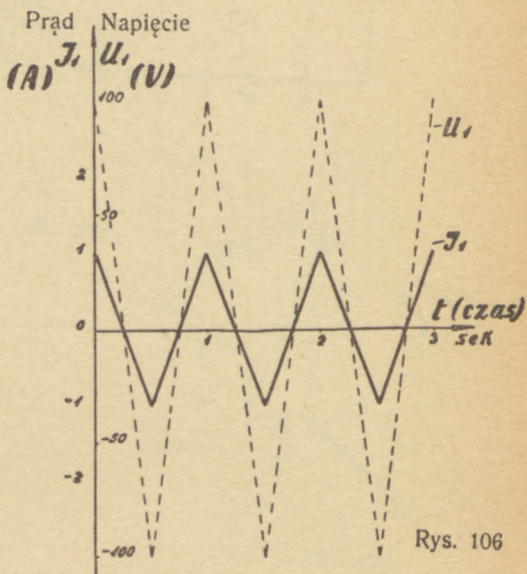
Rys. 103



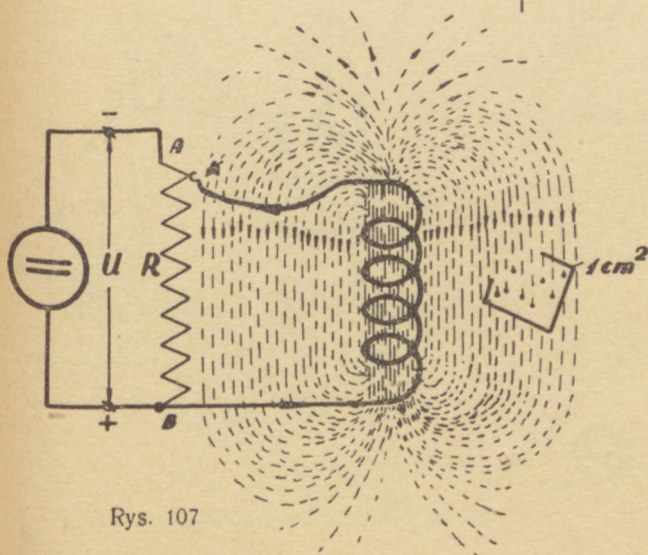
Rys. 104



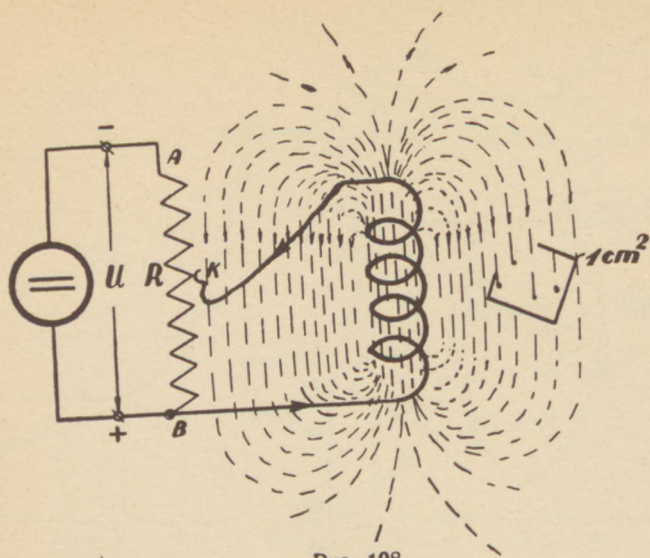
Rys. 105



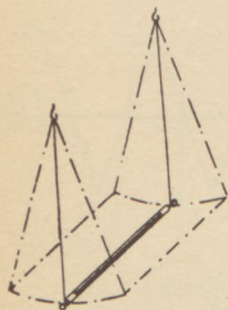
Rys. 106



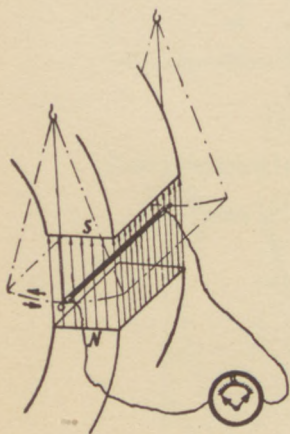
Rys. 107



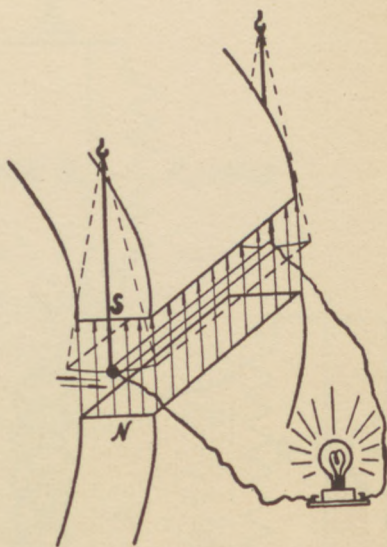
Rys. 108



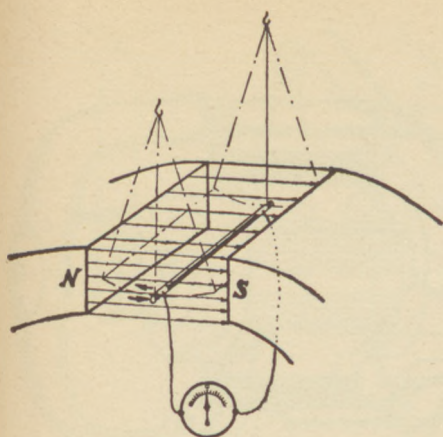
Rys. 109



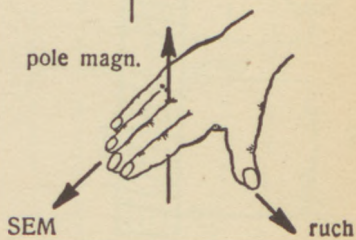
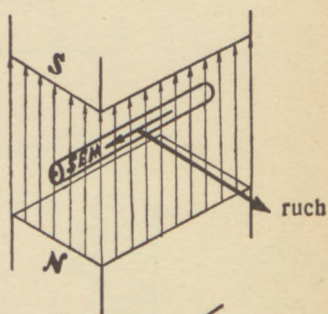
Rys. 111



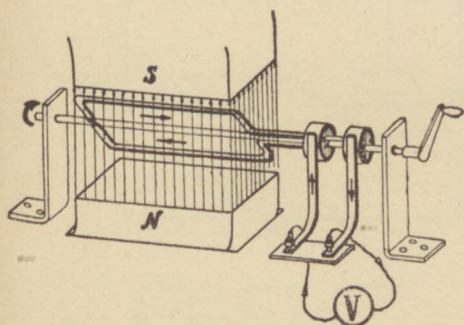
Rys. 110



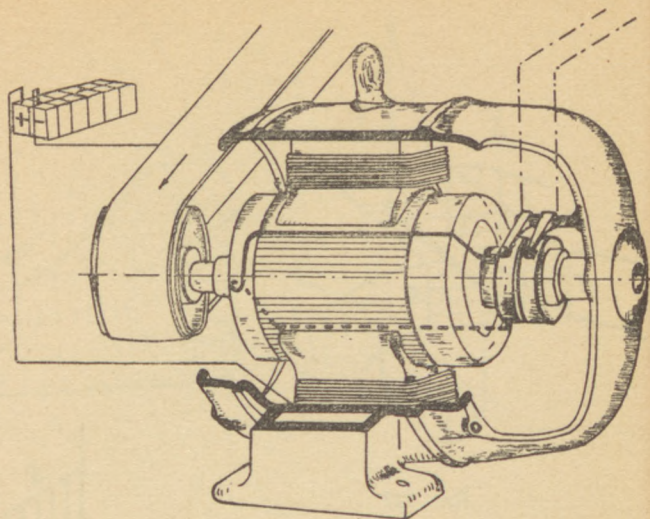
Rys. 112



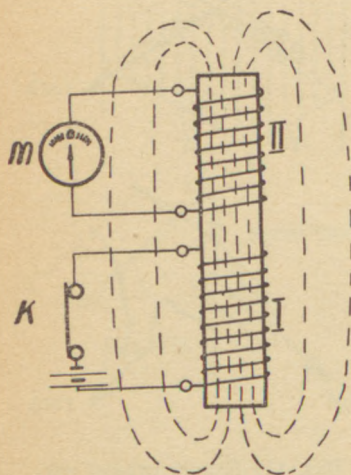
Rys. 113 Reguła prawej ręki



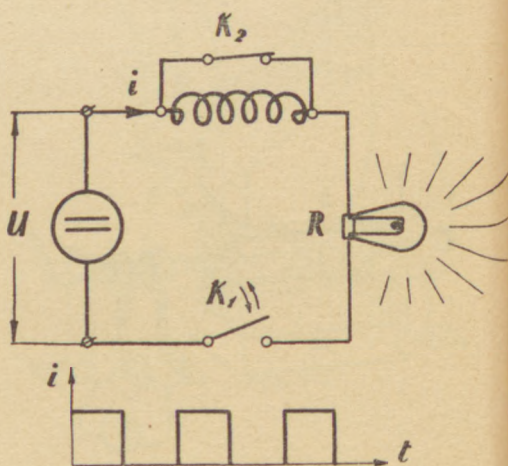
Rys. 114 Zasada prądnicy elektrycznej



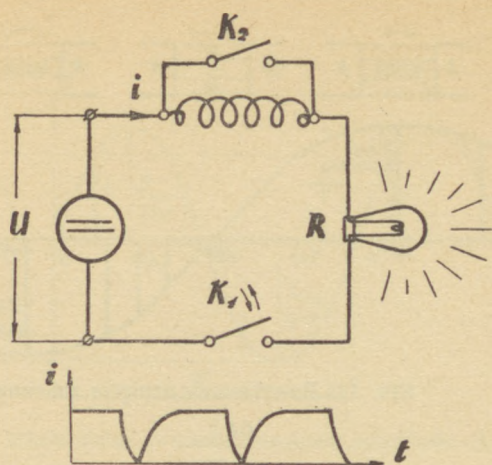
Rys. 115 Prądnicą elektryczną prądu zmiennego



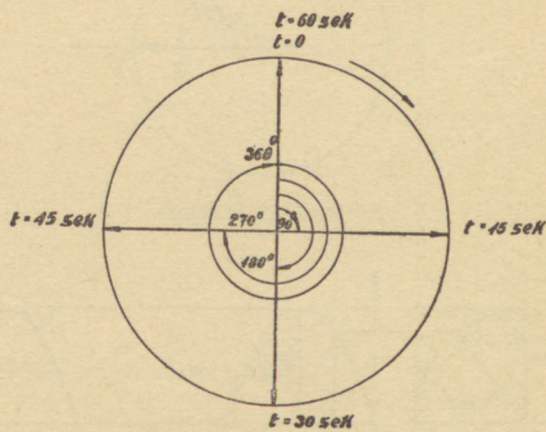
Rys. 116 SEM — indukowana w zwojach obejmujących zmiany strumień magnetyczny



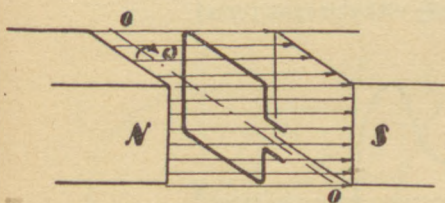
Rys. 117 a



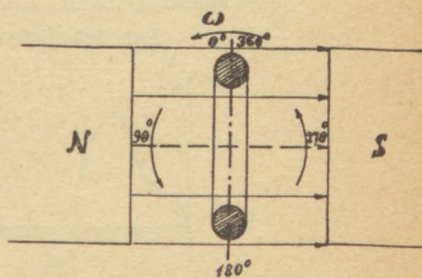
Rys. 117 b



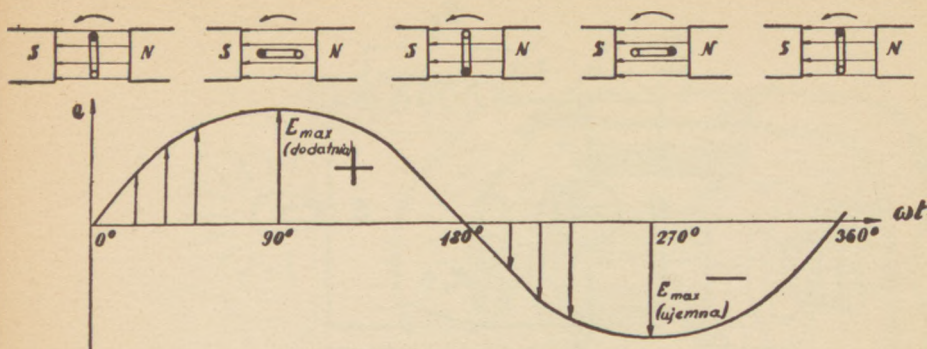
Rys. 118



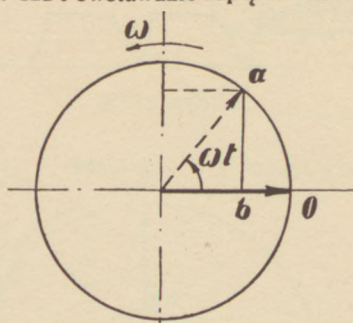
Rys. 119



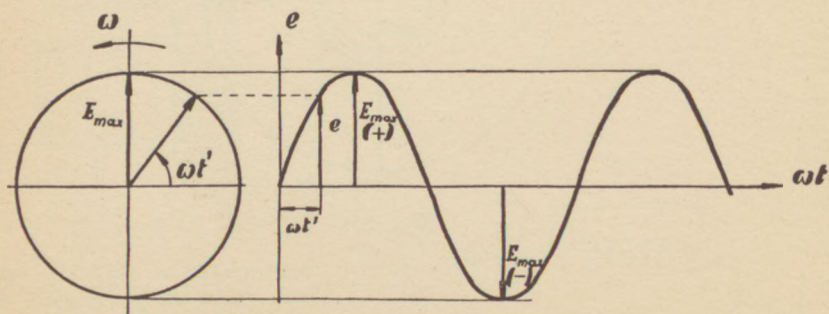
Rys. 120



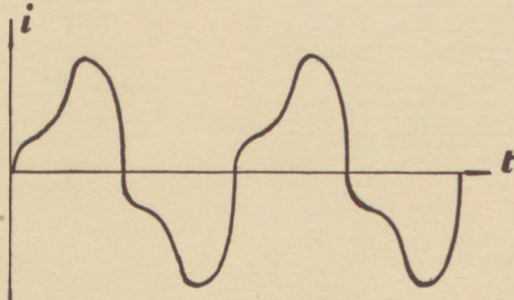
Rys. 121 Powstawanie napięcia zmiennego



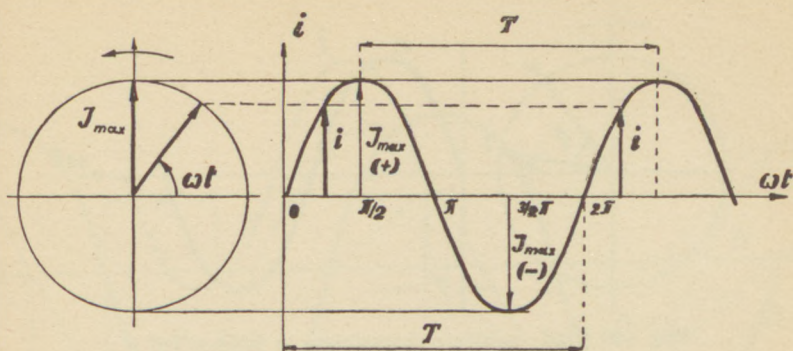
Rys. 122 Wektor



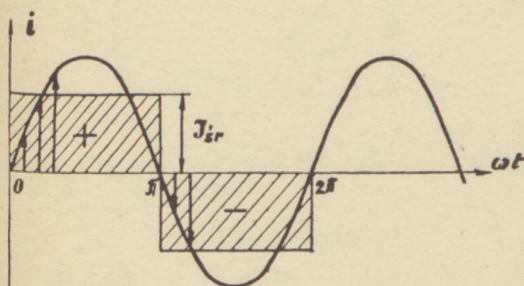
Rys. 123 Sinusoidea siły elektromagnetycznej



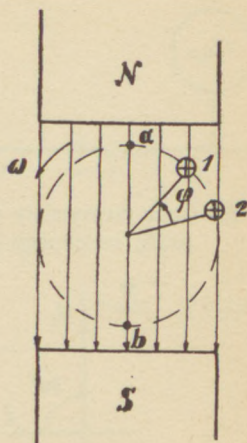
Rys. 124 Prąd niesinusoidalnie zmienny



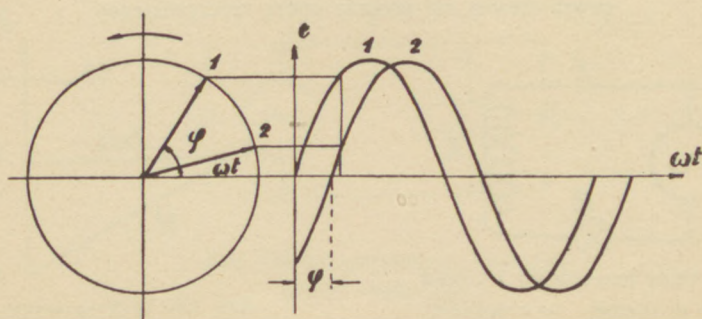
Rys. 125 Prąd sinusoidalny (wartość chwilowa, amplituda, okres)



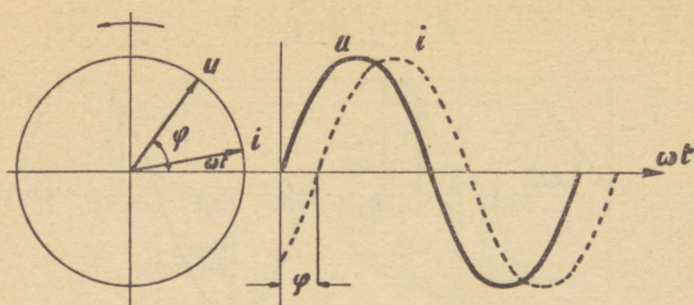
Rys. 126 Wartość średnia prądu sinusoidalnego



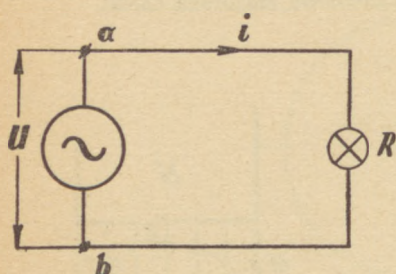
Rys. 127



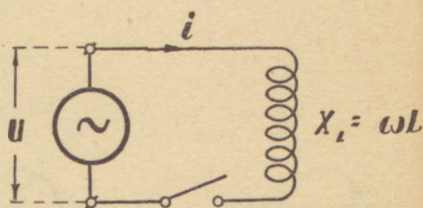
Rys. 128 Przesunięcie fazy



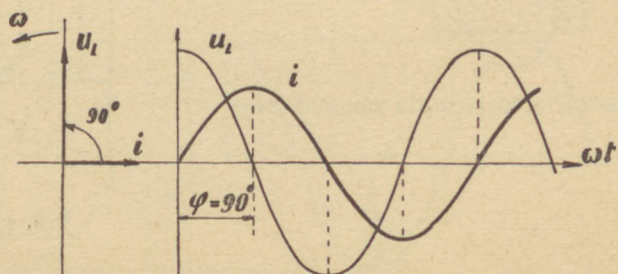
Rys. 129 Prąd: napięcie przesunięte w fazie o kąt φ



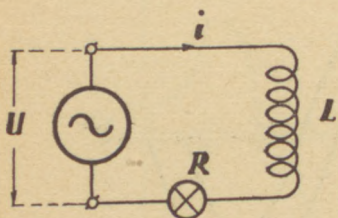
Rys. 130 Opór rzeczywisty w obwodzie prądu zmiennego



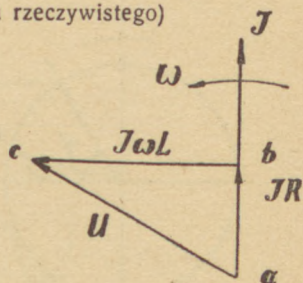
Rys. 131 Cewka w obwodzie prądu zmiennego



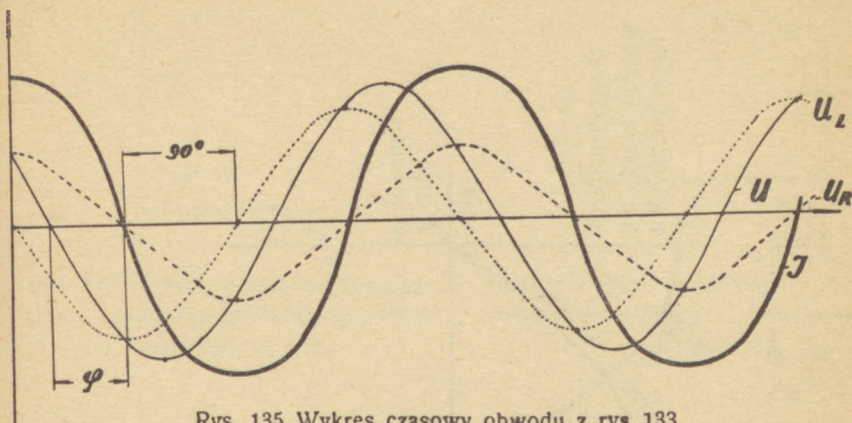
Rys. 132 Wykres wektorowy i czasowy prądu oraz napięcia na cewce (cewka nie posiada oporu rzeczywistego)



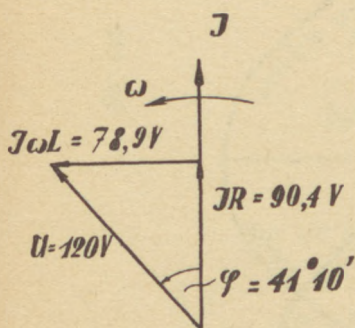
Rys. 133 Opór rzeczywisty i cewka połączone w szereg w obwodzie prądu zmiennego



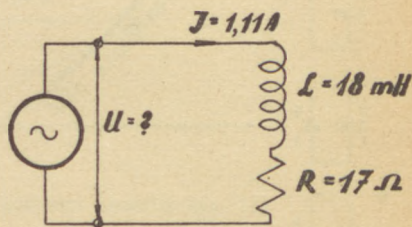
Rys. 134 Wykres wektorowy obwodu z rys. 133



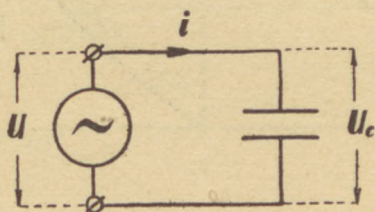
Rys. 135 Wykres czasowy obwodu z rys. 133



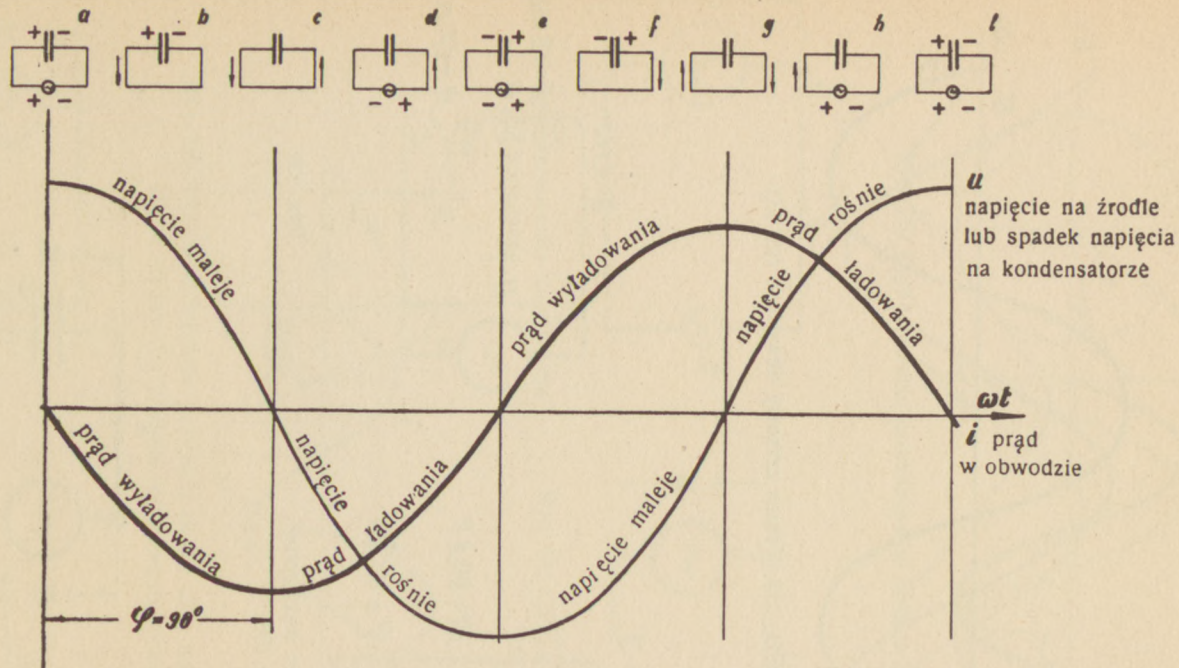
Rys. 136 Wykres wektorowy przykładowy



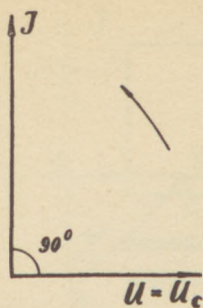
Rys. 137



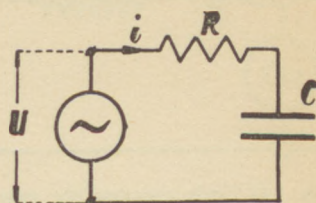
Rys. 138 Kondensator w obwodzie prądu zmiennego



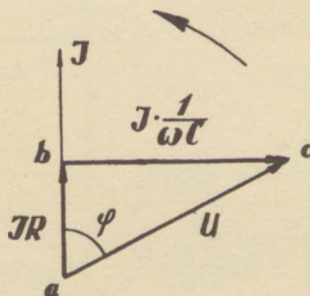
Rys. 139



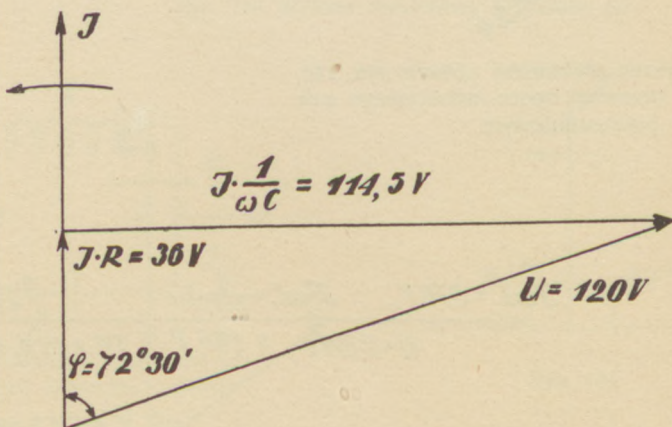
Rys. 140 Wykres wektorowy obwodu prądu zmiennego posiadającego tylko kondensator (rys. 138)



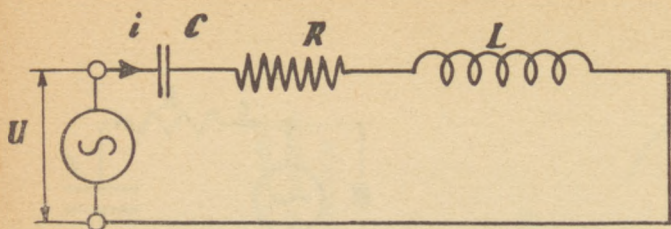
Rys. 141 Opór rzeczywisty i kondensator połączone w szereg i zasilane prądem zmiennym



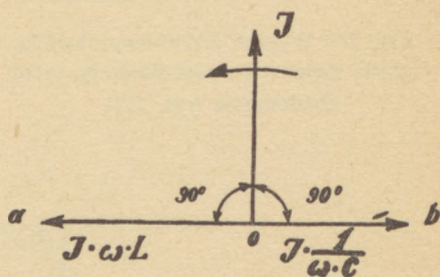
Rys. 142 Wykres wektorowy obwodu rys. 141



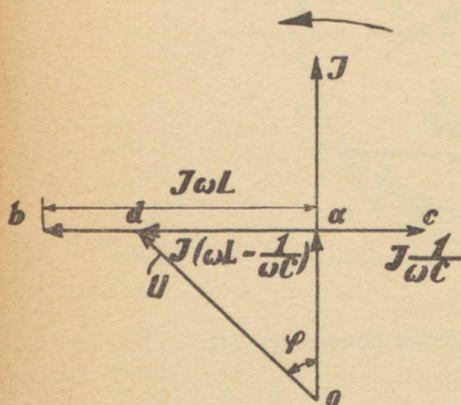
Rys. 143 Wykres wektorowy przykładu 40



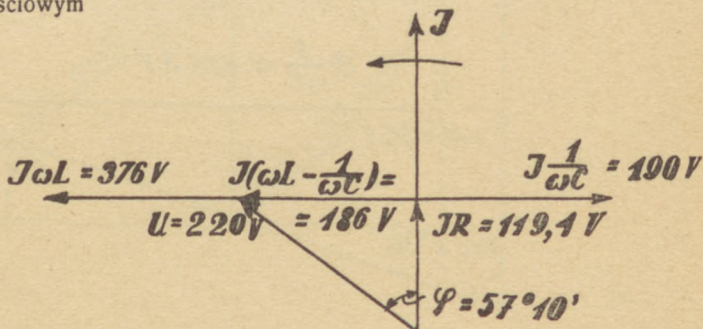
Rys. 144 Opór rzeczywisty, cewka i kondensator połączone w szereg i zasilane prądem zmiennym (rezonans napięć)



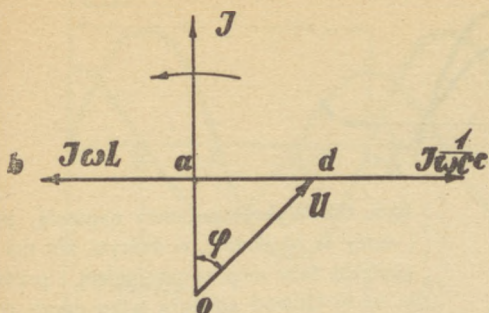
Rys. 145



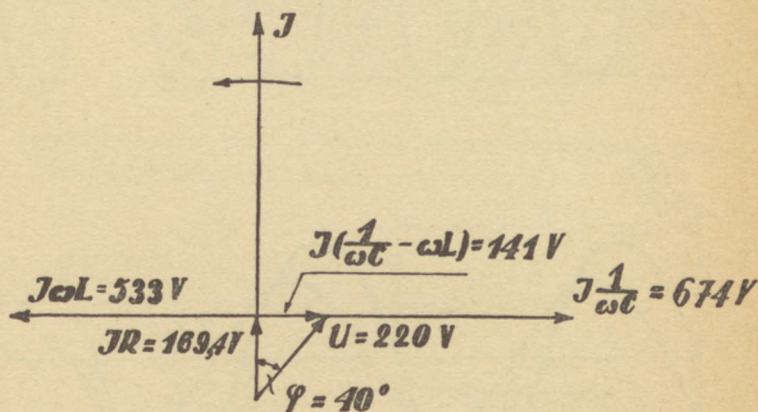
Rys. 146 Wykres wektorowy obwodu rys. 144 w założeniu przewagi oporu indukcyjnego nad pojemnościowym



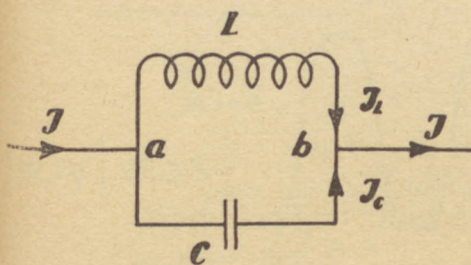
Rys. 147 Wykres wektorowy przykładu 41



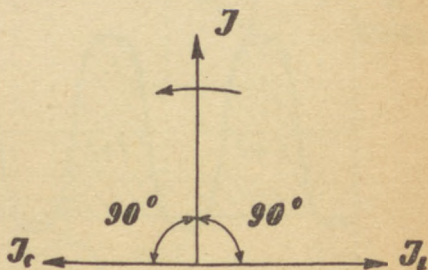
Rys. 148 Wykres wektorowy obwodu rys. 144 w założeniu przewagi oporu pojemnościowego nad indukcyjnym



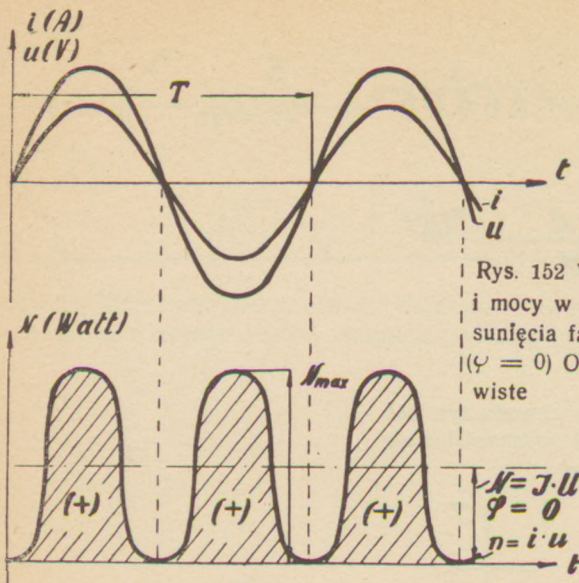
Rys. 149 Wykres wektorowy przykładu 42



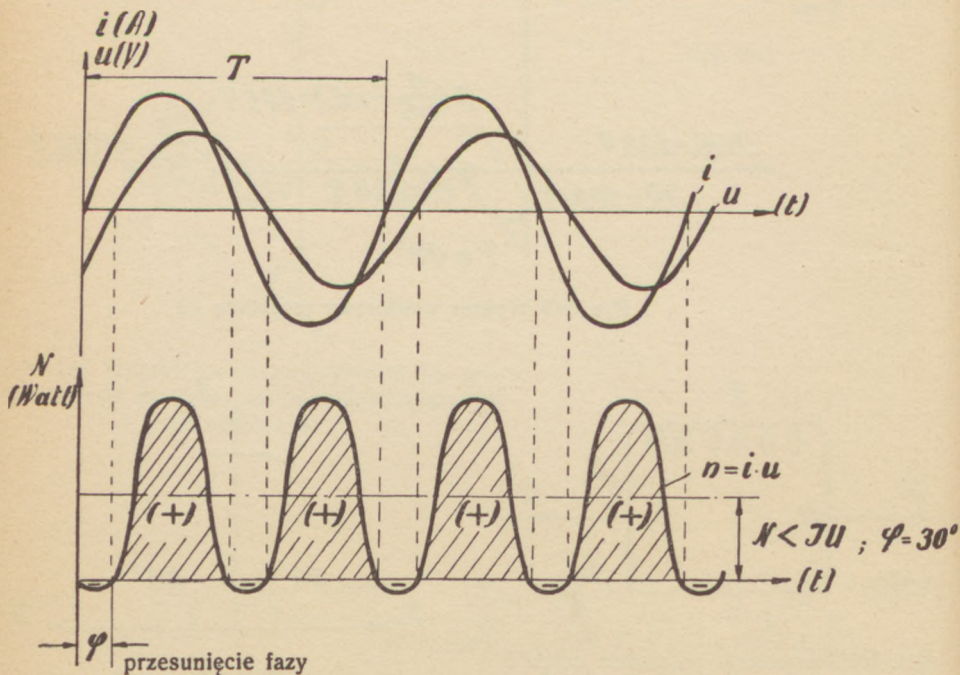
Rys. 150 Równoległe połączenie cewki i kondensatora (rezonans prądów)



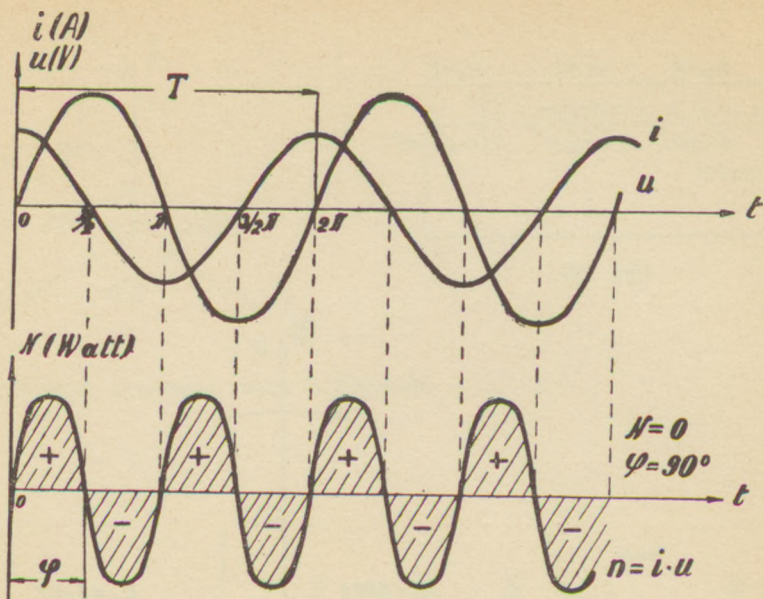
Rys. 151



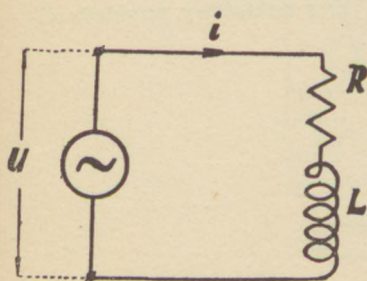
Rys. 152 Wykres czasowy napięcia, prądu i mocy w obwodzie, w którym nie ma przesunięcia fazy między napięciem i prądem ($\varphi = 0$) Obwód zawiera tylko opory rzeczywiste



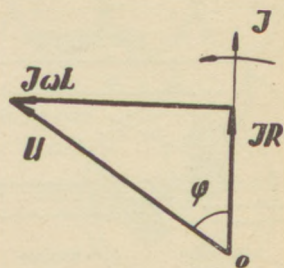
Rys. 153 Wykres czasowy napięcia, prądu i mocy w obwodzie, w którym istnieje przesunięcie fazy między napięciem i prądem ($\varphi \neq 0$) Obwód zawiera prócz oporów rzeczywistych jeszcze opór pojemnościowy lub indukcyjny



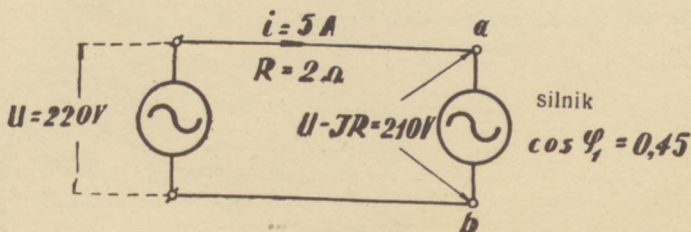
Rys. 154 Wykres czasowy napięcia, prądu i mocy dla obwodu zawierającego tylko opór pojemnościowy lub indukcyjny ($\varphi = 90^\circ$)



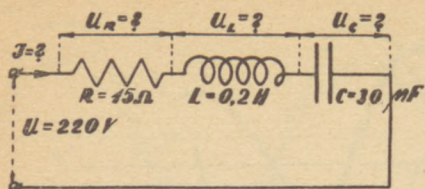
Rys. 155



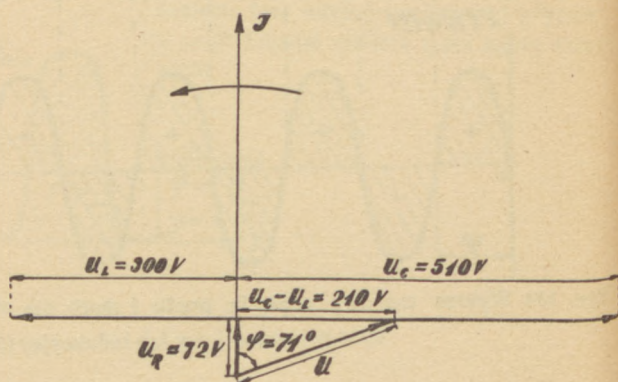
Rys. 156



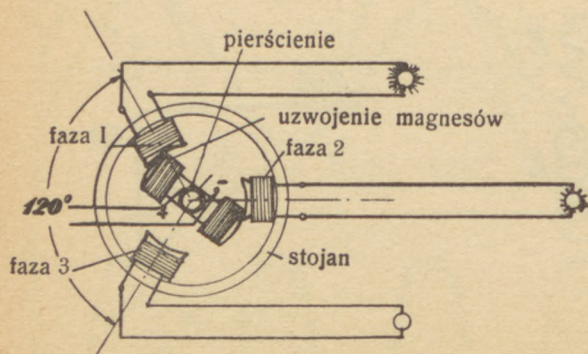
Rys. 157



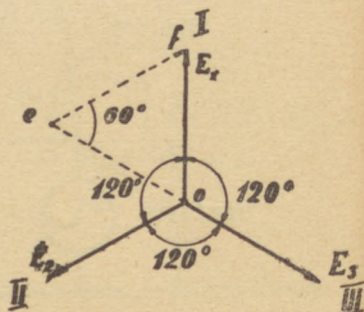
Rys. 158



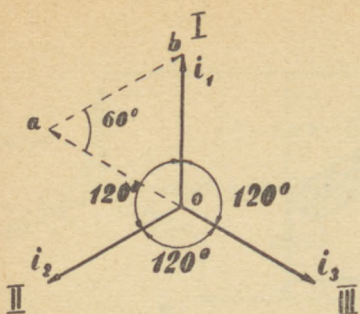
Rys. 159 Wykres wektorowy przykłądu 47



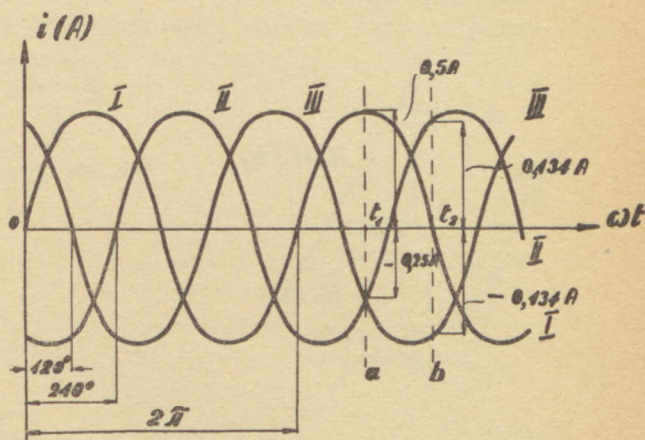
Rys. 160 Zasada prądnicy trójfazowej



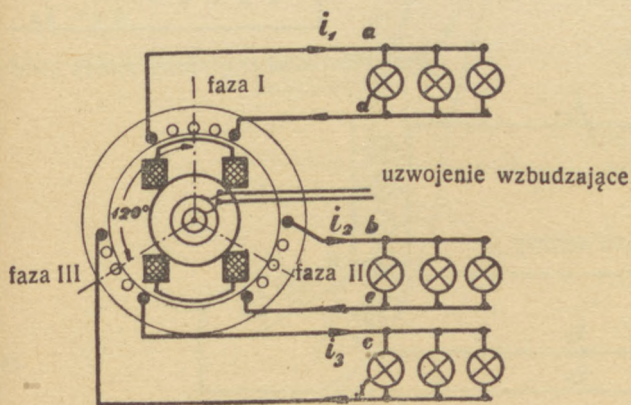
Rys. 161 Wykres wektorowy napięć prądu trójfazowego



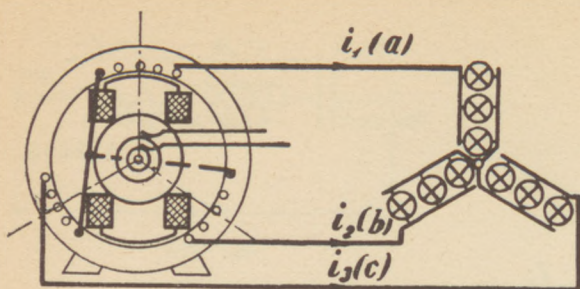
Rys. 162 Wykres wektorowy prądu trójfazowego



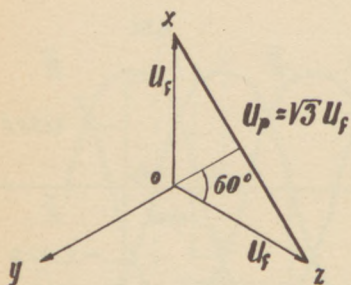
Rys. 163 Wykres czasowy prądu trójfazowego



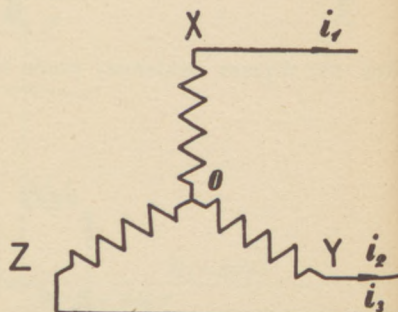
Rys. 164



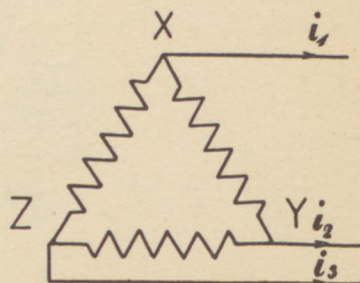
Rys. 166



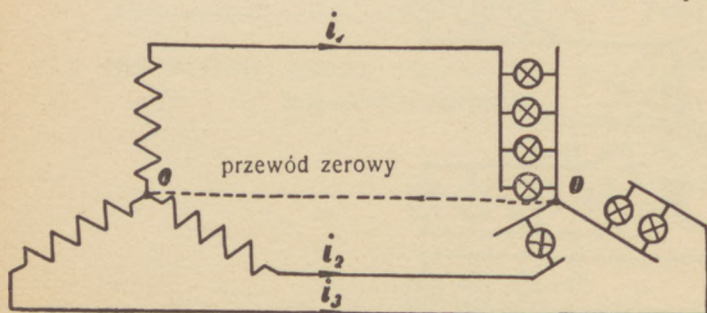
Rys. 167



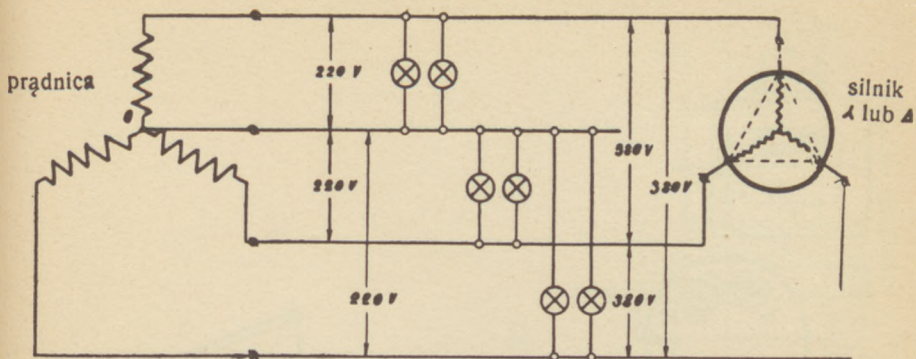
Rys. 166 Układ trójfazowy zwany „gwiazdą”



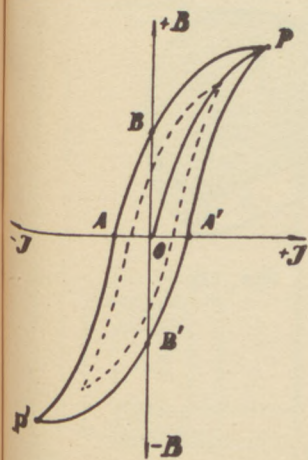
Rys. 168 Układ trójfazowy zwany „trójkątem”



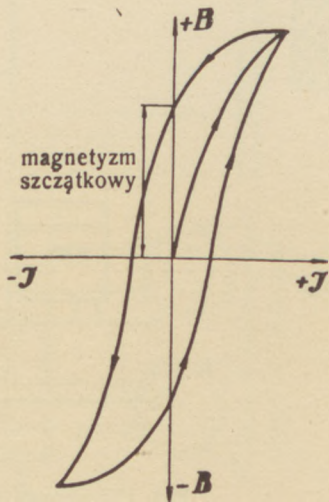
Rys. 169 Gniazda z przewodem zerowym



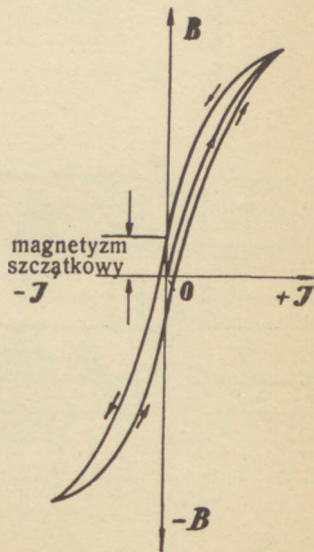
Rys. 170 Przykład instalacji prądu trójfazowego. Żarówki pracują na napięcie 220 V istniejące między poszczególną fazą a przewodem zerowym. Silnik na napięcie między przewodowe, 3 x 380 V



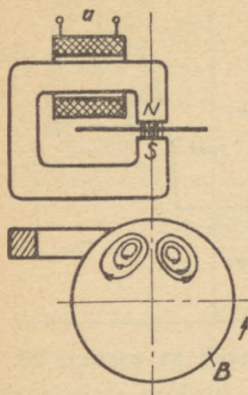
Rys. 171 Pętla histerezy



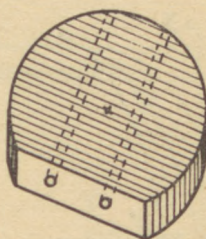
Rys. 173 Pętla histerezy dla stali



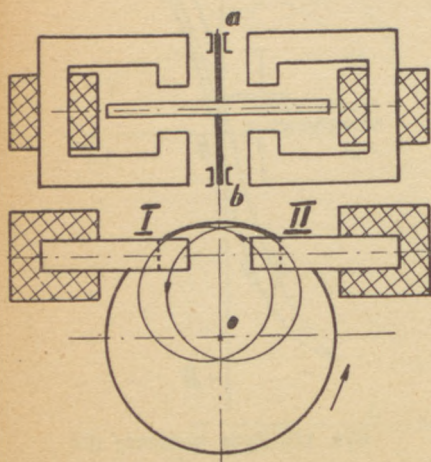
Rys. 172 Pętla histerezy dla żelaza miękkiego (blachy transformatorowej)



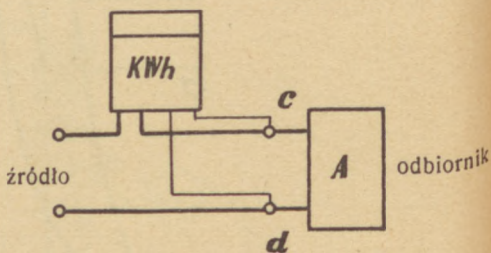
Rys. 174 Prądy wirowe



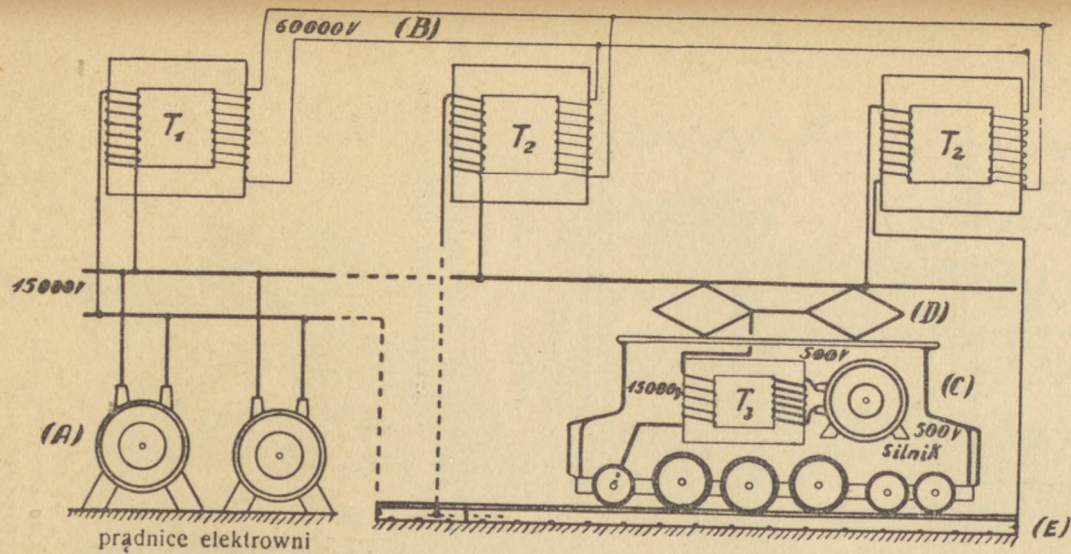
Rys. 175



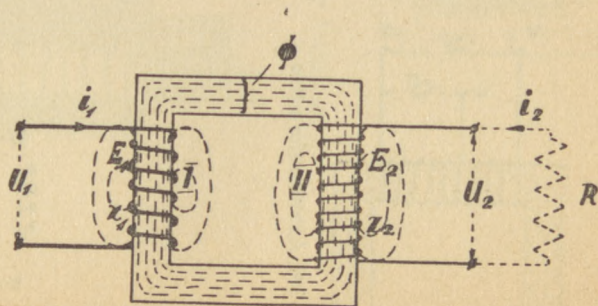
Rys. 176 Licznik indukcyjny energii elektrycznej prądu zmiennego



Rys. 177 Sposób załączania licznika na sieć



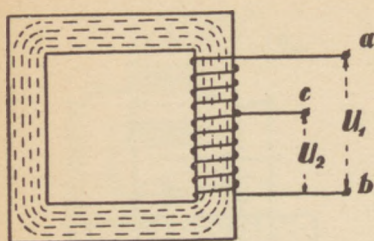
Rys. 178 Przykład zastosowania transformatorów



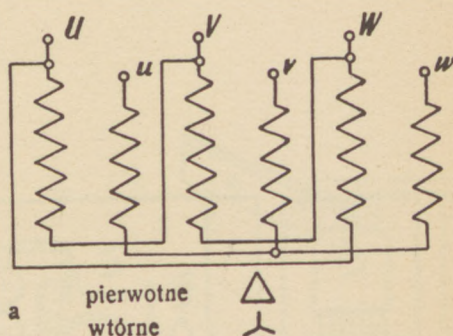
uzwojenie pierwotne

uzwojenie wtórne

Rys. 179 Schemat transformatora

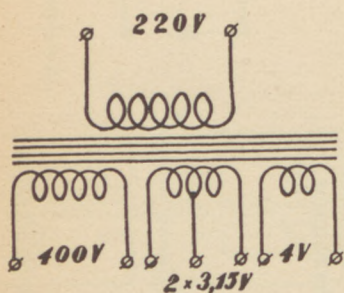


Rys. 180 Autotransformator

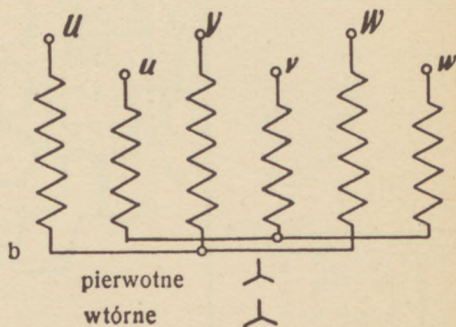


a

pierwotne
wtórne



Rys. 181 Transformator wielozwojeniowy
(stosowany np. do zasilania odbiorników
radiowych)

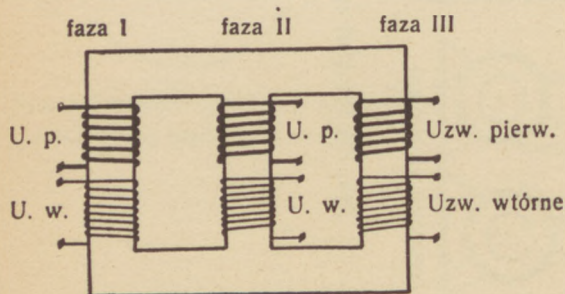


b

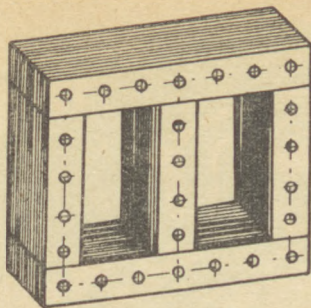
pierwotne
wtórne



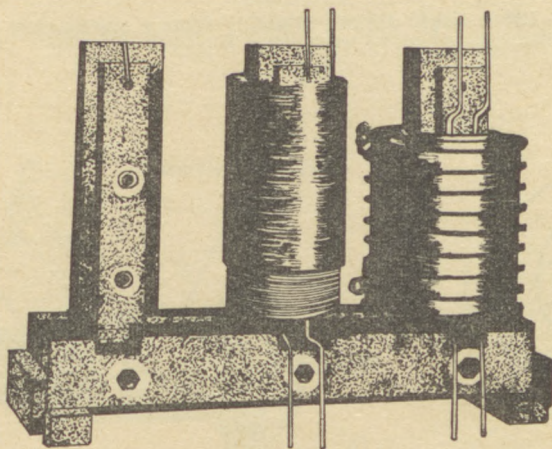
Rys. 183 Schematyczne przedstawienie
transformatora trójfazowego



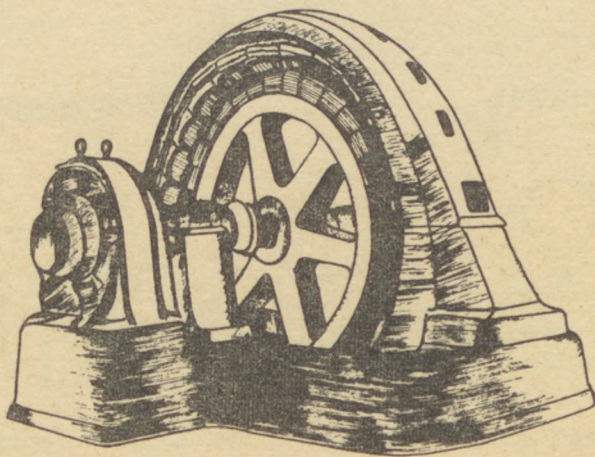
Rys. 182 Transformator trójfazowy



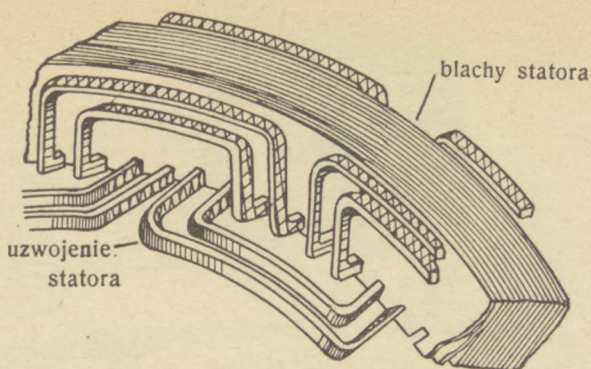
Rys. 184 Rdzeń transformatora trójfazowego



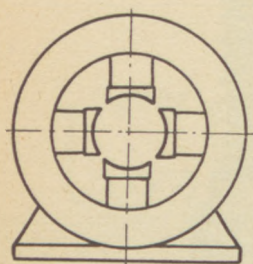
Rys. 185 Transformator trójfazowy w trakcie budowy. Widać rdzeń, uzwojenie pierwotne niskonapięciowe (na środkowym słupie), uzwojenie wtórne wysokonapięciowe na prawym słupie rdzenia



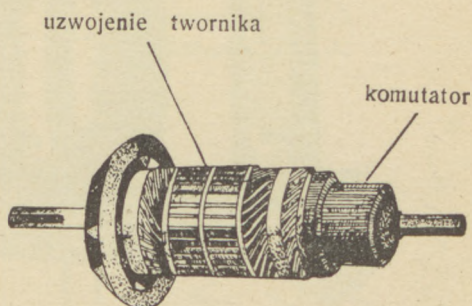
Rys. 186 a Prądnica prądu zmiennego



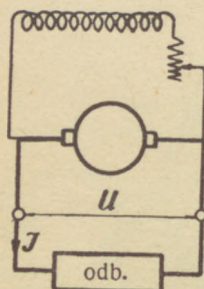
Rys. 186 b Część statora prądnicy wraz z uzwojeniem



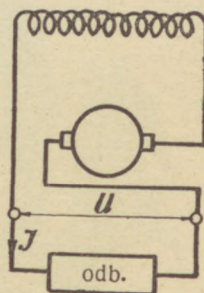
Rys. 187 Stator prądnicy prądu stałego



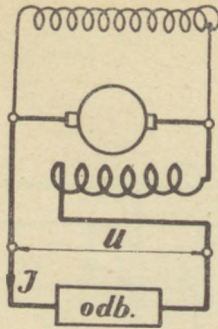
Rys. 188 Wirnik prądnicy prądu stałego wraz z komutatorem



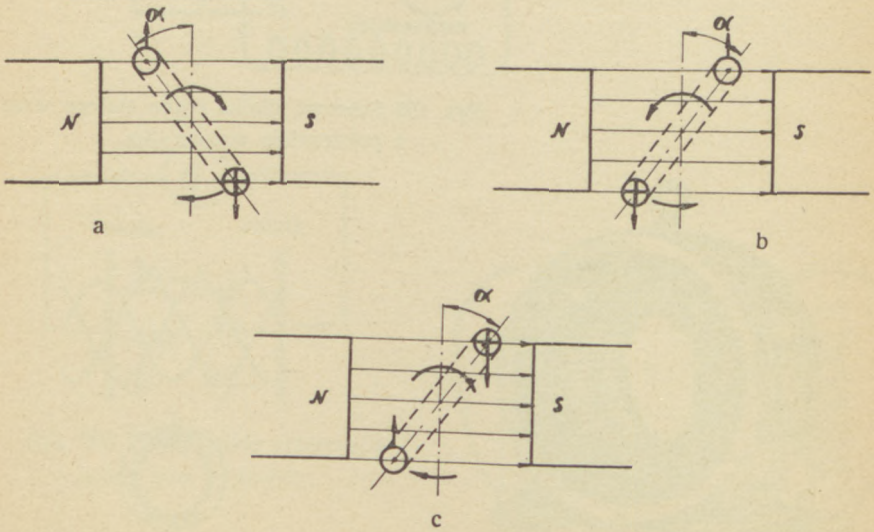
Rys. 189 Prądnica bocznikowa prądu stałego (schemat)



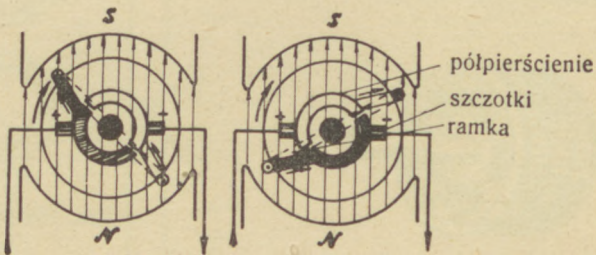
Rys. 190 Prądnica szeregową prądu stałego (schemat)



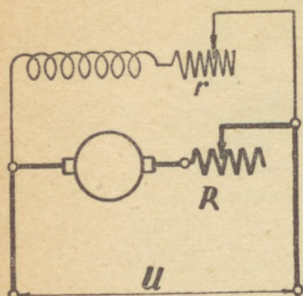
Rys. 191 Prądnica szeregowo-bocznikowa prądu stałego



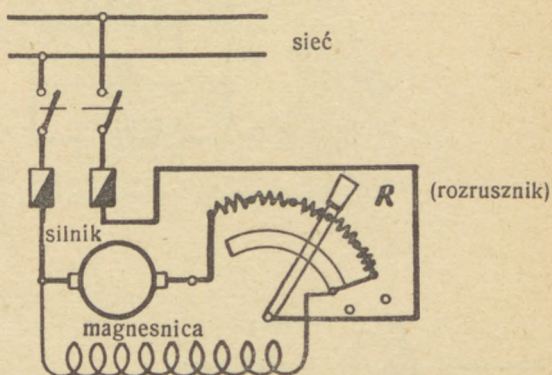
Rys. 192



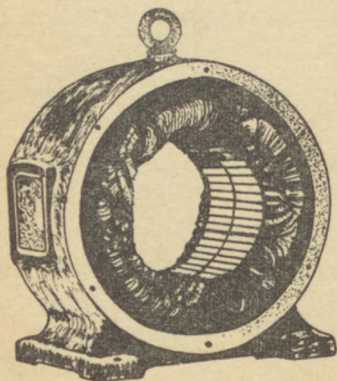
Rys. 193 Komutator zmienia kierunek momentu obrotowego w silniku prądu stałego



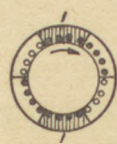
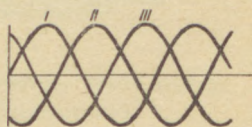
Rys. 194 Silnik bocznikowy prądu stałego (schemat)



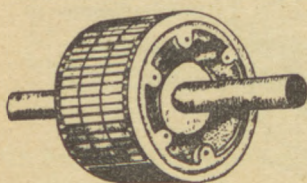
Rys. 195 Schemat silnika prądu stałego wraz z pokazaniem rozrusznika



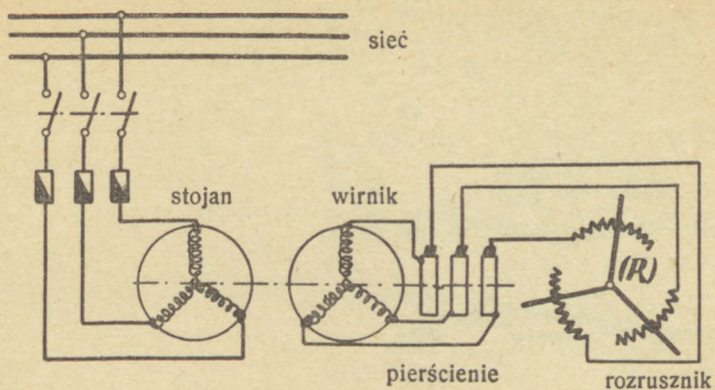
Rys. 196 Stator silnika asynchronicznego



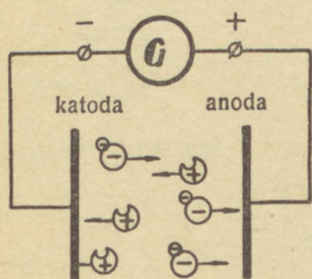
Rys. 198 Pole wirujące



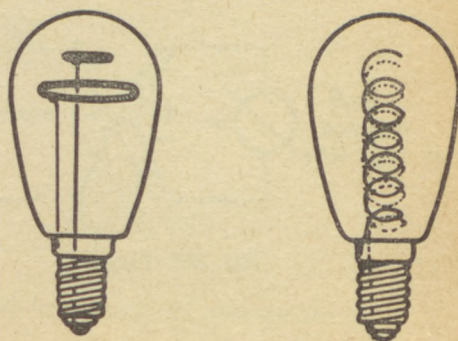
Rys. 197 Wirnik klatkowego silnika asynchronicznego



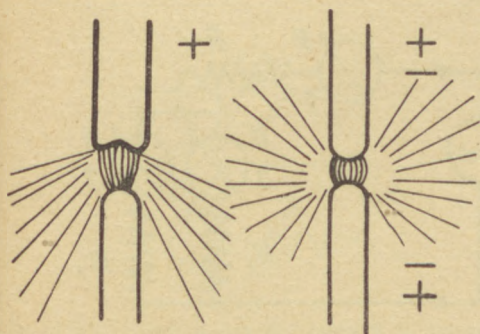
Rys. 199 Schemat załączenia na sieć silnika asynchronicznego pierścieniowego



Rys. 200 Przenoszenie elektronów przez jony w gazach



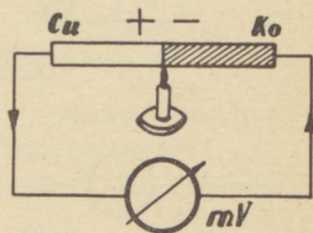
Rys. 201 Neonówki



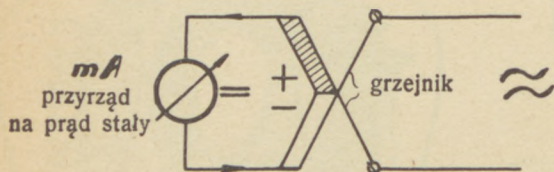
Rys. 202 Lampa łukowa



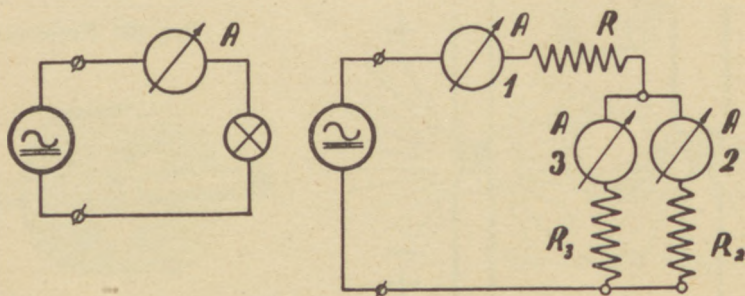
Rys. 203 Podział ładunków elektrycznych w czasie burzy



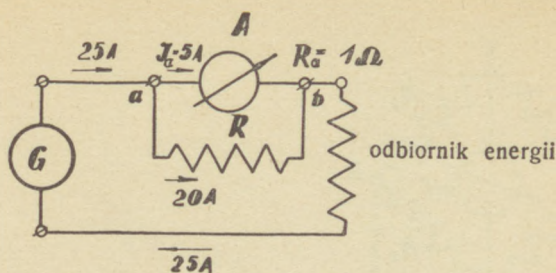
Rys. 204 Termoelement



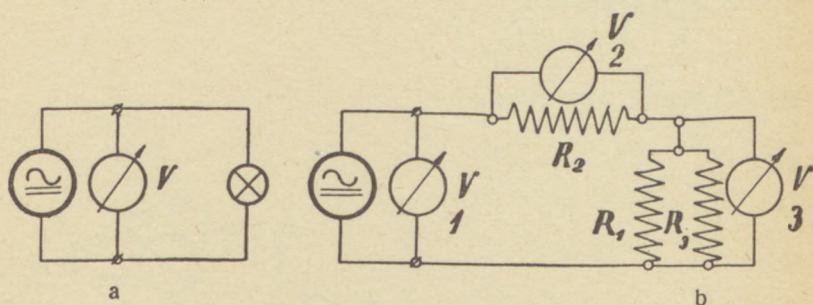
Rys. 205 Termo



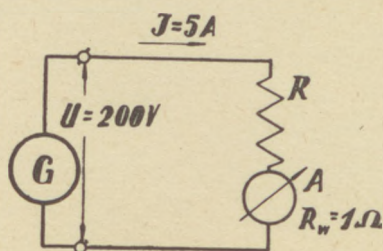
Rys. 206 Załączenie amperomierza



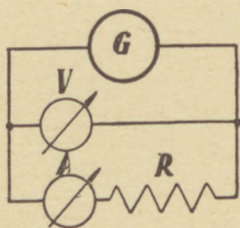
Rys. 207 Bocznikowanie amperomierza



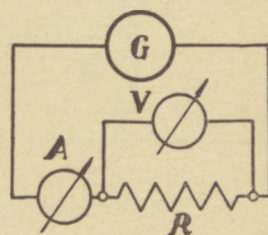
Rys. 208 Załączenie woltomierza



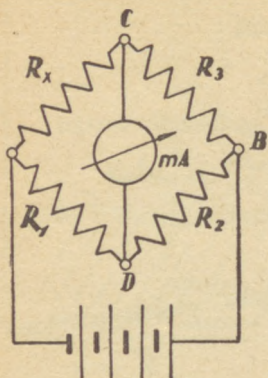
Rys. 209 Amperomierz można wykorzystać do pomiaru napięć



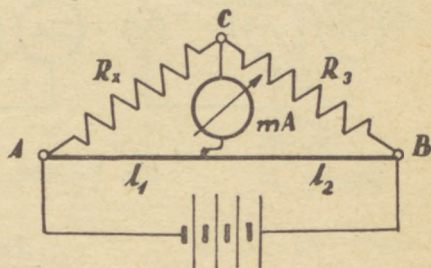
Rys. 210 Pomiar oporności metodą techniczną



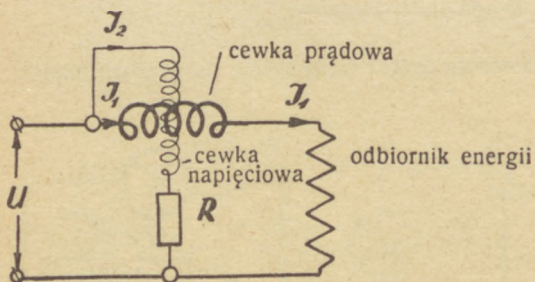
Rys. 211



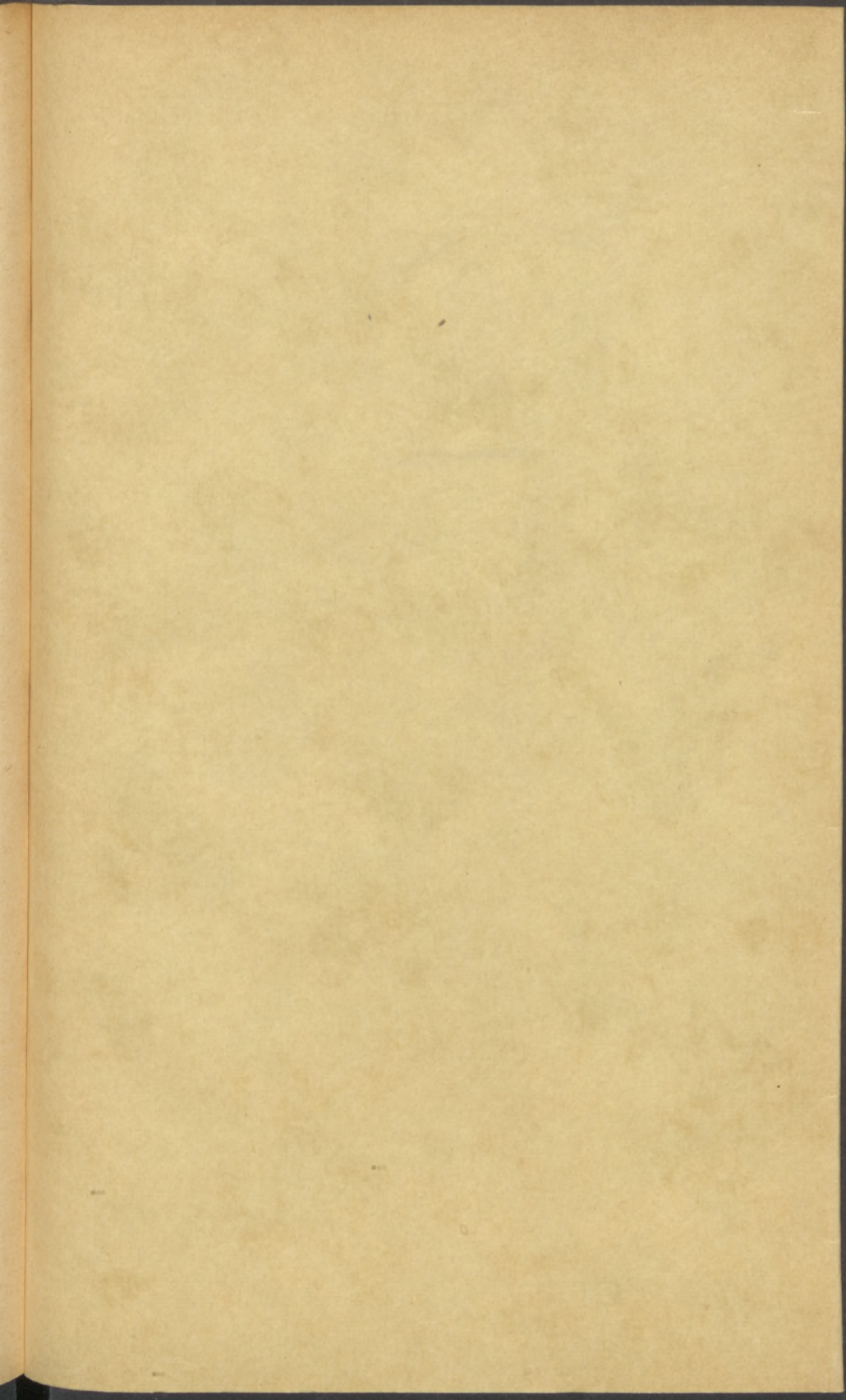
Rys. 212 Mostek Wheatstone'a

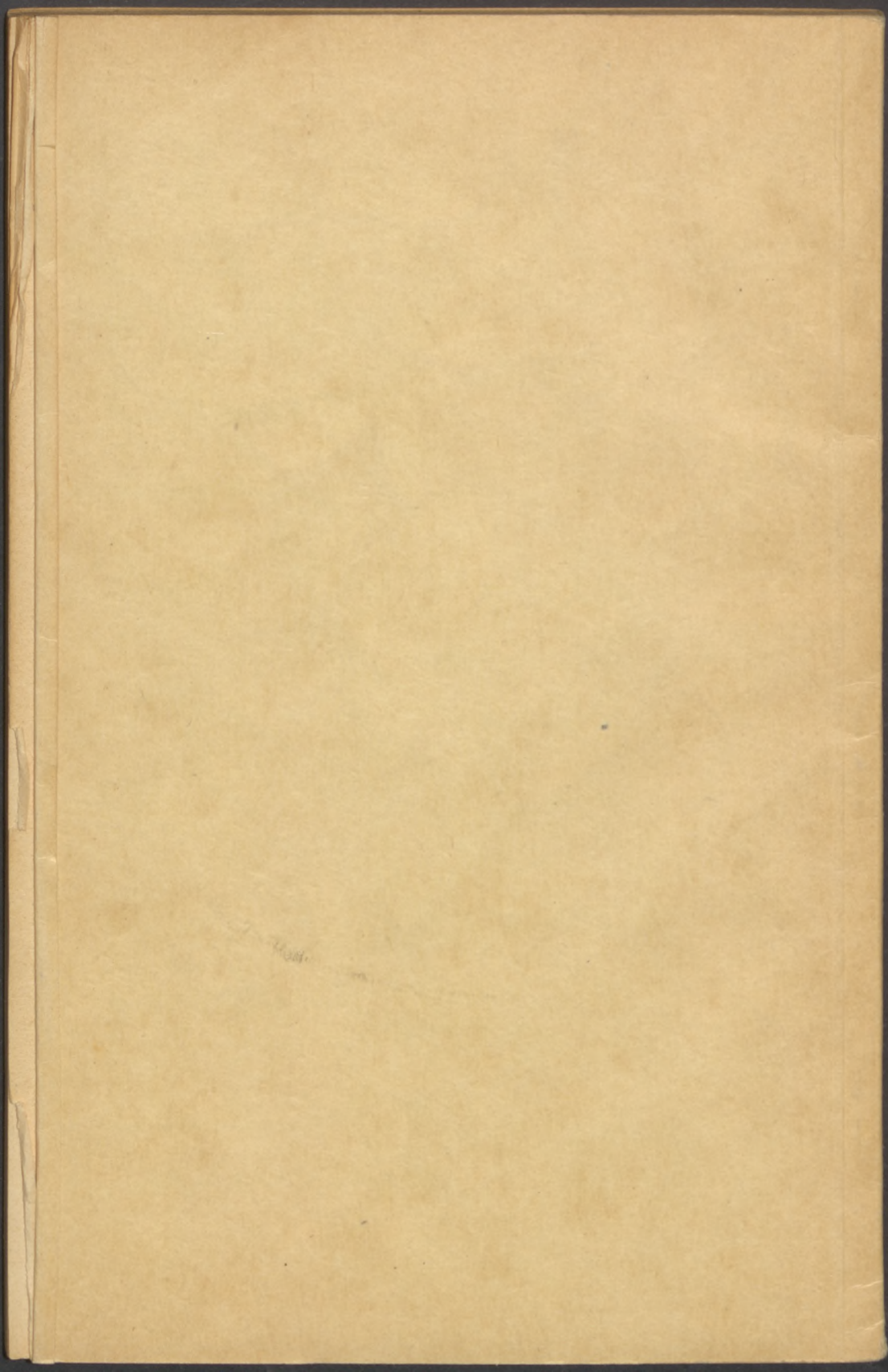


Rys. 213



Rys. 214 Watomierz (pomiar mocy)





Biblioteka
Główna
UMK Toruń
+ 122.

724771