

PPLK. INŻ. S. RYMSZEWICZ

ZASADY  
ELEKTROTECHNIKI

Dyell

8302

INŻYNIER **STANISŁAW RYMSZEWICZ**  
PODPULKOWNIK

---

# ZASADY ELEKTROTECHNIKI

WYDANIE TRZECIE POPRAWIONE

~~BIBLIOTEKA~~  
~~6. PUŁKU LOTNICZEGO.~~

*7/129 A.*

*Mad*  
*Evry*

WARSZAWA 1928.



135033

2249/12

## SPIS RZECZY.

WIADOMOŚCI WSTĘPNE.	str.
Spoczynek i ruch . . . . .	1
Droga, prędkość i przyspieszenie . . . . .	1
Prawa Newtona . . . . .	6
Pierwsze prawo Newtona . . . . .	6
Drugie prawo Newtona . . . . .	6
Trzecie prawo Newtona . . . . .	6
Praca . . . . .	6
Moc . . . . .	7
Podział jednostek na zasadnicze i pochodne . . . . .	7
Układ bezwzględny C. G. S. . . . .	8
Jednostki absolutne i praktyczne . . . . .	8
Energja . . . . .	11
Rodzaje energii . . . . .	11
Energja kinetyczna i potencjalna . . . . .	13
Przekształcenie energii . . . . .	15
Zasada zachowania energii . . . . .	15
Mechaniczny równoważnik ciepła . . . . .	16
Zadania . . . . .	17

## ELEKTROSTATYKA.

Elektryzowanie przez tarcie . . . . .	20
Złe i dobre przewodniki . . . . .	20
Elektryzowanie przez zetknięcie . . . . .	21
Dwa rodzaje elektryczności . . . . .	21
Przyciąganie i odpychanie ciał naelektryzowanych	23
Wahadło elektryczne . . . . .	23

	str.
Elektroskop . . . . .	24
Elektrometr . . . . .	25
<b>Ładunek elektryczny . . . . .</b>	<b>26</b>
Prawo Coulomba . . . . .	26
Zadania . . . . .	28
Rozmieszczenie ładunku elektrycznego . . . . .	28
Gęstość ładunku powierzchniowa . . . . .	29
<b>Pole elektryczne i jego natężenie . . . . .</b>	<b>30</b>
Natężenie pola . . . . .	31
<b>Potencjał elektryczny . . . . .</b>	<b>33</b>
Tabela porównawcza . . . . .	36
Jednostki potencjału elektrycznego . . . . .	36
Różnice potencjałów . . . . .	38
Tabela porównawcza . . . . .	39
Zadania . . . . .	40
Powierzchnie ekwipotencjalne . . . . .	42
<b>Indukcja elektryczna . . . . .</b>	<b>43</b>
<b>Widma linii sił powierzchni ekwipotencjalnych</b>	
pól elektrycznych . . . . .	47
Piorunochron . . . . .	48
<b>Maszyny elektryczne i ich zastosowanie . . . . .</b>	<b>49</b>
<b>Pojemność elektryczna . . . . .</b>	<b>52</b>
Tabela porównawcza . . . . .	53
Jednostki pojemności elektrycznej . . . . .	54
<b>Energja naelektryzowanego ciała . . . . .</b>	<b>55</b>
<b>Zasada kondensatora . . . . .</b>	<b>57</b>
Kondensatory i ich pojemność. Kondensator kulisty . . . . .	61
Kondensator płaski . . . . .	61
Pojemność kondensatora kulistego . . . . .	61
Pojemność kondensatora płaskiego . . . . .	63
Stała dielektryczna . . . . .	64
Zadania . . . . .	64
Energja naładowanego kondensatora . . . . .	65
Tabela porównawcza . . . . .	66
Zadanie . . . . .	67
Butelka lejdejska . . . . .	67
Łączenie kondensatorów w baterje . . . . .	68
Połączenie równoległe kondensatorów . . . . .	69
Połączenie szeregowe kondensatorów . . . . .	70
Połączenie mieszane . . . . .	72
Zadanie . . . . .	73

	str.
Kondensator o zmiennej pojemności . . . . .	74
Płaski kondensator papierowy i mikowy . . . . .	75
<b>Przekształcenie energii elektrycznej w energię mechaniczną i ciepłą . . . . .</b>	<b>76</b>
Dzwonek elektrostatyczny . . . . .	76
Rozbrojenie kondensatora przez przewodnik . . . . .	77
Zadanie . . . . .	78
Rozbrojenie kondensatora przez dielektryk . . . . .	78
<b>Układ elektrostatyczny jednostek wielkości elektrycznych i ich wymiary . . . . .</b>	<b>79</b>

## ELEKTRODYNAMIKA.

Teorja prądu . . . . .	81
Prąd elektryczny i jego własności . . . . .	81
<b>Prąd stały . . . . .</b>	<b>84</b>
Nateżenie prądu . . . . .	84
Prawo Ohma i oporność przewodników . . . . .	85
Przewodniki pierwszej i drugiej klasy . . . . .	88
Przewodzenie elektryczności w metalach i elektrolitach . . . . .	88
Prąd elektryczny w gazach . . . . .	90
Wytrzymałość na przebicie niektórych ciał . . . . .	93
Rozgałęzienie prądu w obwodzie . . . . .	94
Pierwsze prawo Kirchoffa . . . . .	95
Drugie prawo Kirchoffa . . . . .	95
Połączenie szeregowo oporów . . . . .	95
Połączenie równoległe oporności omowych . . . . .	96
Praca prądu . . . . .	97
Moc prądu . . . . .	98
Prawo Joule'a . . . . .	99
Zadania . . . . .	101
<b>Magnetyzm i elektromagnetyzm . . . . .</b>	<b>104</b>
Magnesy naturalne i sztuczne . . . . .	104
Bieguny magnetyczne i ich własności . . . . .	104
Prawo Coulomba . . . . .	107
Jednostka masy magnetycznej . . . . .	107
Pole magnetyczne i linje sił . . . . .	108
Nateżenie pola magnetycznego i jego jednostka . . . . .	109
Potencjał magnetyczny . . . . .	110

	str.
Pole magnetyczne ziemi, igła magnetyczna . . .	111
Moment magnetyczny magnezu . . . . .	113
Wpływ ciał obcych na układ linii sił magnetycznych . . . . .	115
Tabela porównawcza . . . . .	117
<b>Natężenie i strumień indukcji magnetycznej . . .</b>	<b>117</b>
Zadanie . . . . .	119
<b>Magnetyczne działanie prądu . . . . .</b>	<b>119</b>
Pole magnetyczne przewodników z prądem . .	120
Prawo Laplace'a i układ jednostek elektromagnetycznych . . . . .	123
Natężenie pola magnetycznego przewodników z prądem . . . . .	127
Tabela porównawcza . . . . .	129
Działanie pola magnetycznego na przewodnik z prądem . . . . .	130
Praca w polu elektromagnetycznym . . . . .	132
Praca przy przesunięciu przewodnika w polu magnetycznym . . . . .	132
Elektromagnes . . . . .	134
Histereza . . . . .	135
Siła przyciągania elektromagnesu . . . . .	139
Dzwonki elektryczne . . . . .	140
Zadania . . . . .	142
<b>Indukcja elektromagnetyczna. Doświadczenia Faraday'a . . . . .</b>	<b>146</b>
Wielkość siły elektromagnetycznej indukcji . .	148
Reguła Lenza . . . . .	152
Prądy wirowe Foucault'a . . . . .	153
Zadania . . . . .	155
<b>Prąd zmienny . . . . .</b>	<b>157</b>
<b>Prądy sinusoidalne . . . . .</b>	<b>157</b>
Moc prądu zmiennego . . . . .	162
Oporność omowa dla prądów zmiennych . . .	164
Naskórkowość . . . . .	164
Samoodukcja . . . . .	166
Spółczynnik samoindukcji lub indukcyjność . .	167
Wielkość elektromagnetycznej siły samoindukcji	169
Kierunek prądu samoindukcyjnego . . . . .	172
Wpływ samoindukcji w obwodzie z prądem stałym . . . . .	172



	str.
Potencjalna energia prądu czyli energia strumienia magnetycznego . . . . .	174
Wpływ samoindukcji w obwodzie z prądem zmiennym . . . . .	176
Zadanie . . . . .	179
Wpływ pojemności w obwodzie z prądem zmiennym . . . . .	180
Zadanie . . . . .	183
Wpływ pojemności i samoindukcji w obwodzie z prądem zmiennym . . . . .	184
Rezonans, Wzór Thomsona . . . . .	185
Zadanie . . . . .	186
Praktyczne zastosowanie zjawiska rezonansu .	187
Praktyczne zastosowanie pojemności i samoindukcji w obwodach z prądem stałym i zmiennym . . . . .	189
<b>Wzajemna indukcja. Obwody sprzężone . . . . .</b>	<b>193</b>
Spółczynnik indukcji wzajemnej lub indukcyjność wzajemna . . . . .	195
Systemy sprzężenia obwodów . . . . .	198
Sprzężenie indukcyjne czyli transformatorowe .	199
Sprzężenie autotransformatorowe . . . . .	199
Sprzężenie pojemnościowe . . . . .	199
Sprzężenie oporowe . . . . .	200
<b>Prąd trójfazowy . . . . .</b>	<b>200</b>
Połączenie w gwiazdę . . . . .	202
Połączenie w trójkąt . . . . .	204
Moc prądu trójfazowego . . . . .	205
<b>Miernictwo elektryczne . . . . .</b>	<b>209</b>
<b>Pomiar oporu . . . . .</b>	<b>210</b>
Most. k Wheatston'a . . . . .	215
Mostek Nipolda . . . . .	218
<b>Pomiar pojemności zapomocą mostka Seibt'a . .</b>	<b>220</b>
<b>Pomiar natężenia i napięcia prądu . . . . .</b>	<b>221</b>
<b>Pomiar natężenia prądu. Galwanoskop . . . . .</b>	<b>222</b>
Galwanometr . . . . .	223
Galwanometr tangencjalny albo busola stycznych	223
Galwanometr Deprez—d'Arsonval'a . . . . .	224
Galwanometr telegraficzny . . . . .	225
Amperomierz z ruchomą zwojnicą . . . . .	226

	str.
Amperomierz elektromagnetyczny . . . . .	227
Amperomierz elektrodynamiczny . . . . .	227
Amperomierz cieplny . . . . .	228
Amperomierz indukcyjny . . . . .	229
Bocznik . . . . .	229
Pomiar natężenia prądu zmiennego . . . . .	231
<b>Pomiar napięcia lub siły elektromagnetycznej . .</b>	<b>231</b>
Zadnia . . . . .	233
<b>Pomiar mocy prądu . . . . .</b>	<b>234</b>
<b>Pomiar pracy prądu . . . . .</b>	<b>235</b>
<b>Maszyny elektryczne . . . . .</b>	<b>237</b>
<b>Prądnice . . . . .</b>	<b>237</b>
Budowa i praca prądnic prądu stałego . . . . .	239
Magneśnica . . . . .	239
Twornik . . . . .	239
Prądnice wielobiegunowe . . . . .	243
Kolektor . . . . .	244
Szczotki . . . . .	245
Wzbudzanie prądnic . . . . .	248
Prądnica obcowzbudna . . . . .	251
Prądnica szeregową . . . . .	252
Prądnica bocznikowa . . . . .	253
Prądnica szeregowo - bocznikowa . . . . .	256
Prądnice prądu zmiennego . . . . .	257
Prądnica o ruchomym tworniku i nieruchomej magneśnicy . . . . .	260
Prądnica o nieruchomym tworniku i ruchomej magneśnicy . . . . .	261
Prądnica o nieruchomym tworniku i nierucho- mem uzwojeniu magneśnicy z wirującym rdzeniem żelaznym . . . . .	262
Obsługa prądnic . . . . .	264
<b>Silniki elektryczne . . . . .</b>	<b>266</b>
Moment obrotowy silnika . . . . .	267
Kierunek obrotu silnika . . . . .	270
Ustawienie szczotek w silniku elektrycznym . .	271
Siła przeciwelektromotoryczna . . . . .	271
<b>Budowa i własności silników elektrycznych . . .</b>	<b>274</b>
Szybkość obrotowa silnika . . . . .	274
Silnik szeregowy . . . . .	276

	str.
Zadanie . . . . .	278
Silnik bocznikowy . . . . .	280
Zadanie . . . . .	283
Silnik prądu zmiennego . . . . .	283
Silniki synchroniczne . . . . .	284
Silniki asynchroniczne . . . . .	284
Silniki kolektorowe . . . . .	286
Obsługa silników elektrycznych . . . . .	286
<b>Transformatory . . . . .</b>	<b>287</b>
- Współczynnik transformacji i współczynnik sprawności transformatora . . . . .	289
Przenoszenie energii elektrycznej na odległość . . . . .	292
<b>Przetwornice . . . . .</b>	<b>294</b>
<b>Cewka Ruhmcorff'a . . . . .</b>	<b>295</b>
<b>Lampa katodowa . . . . .</b>	<b>297</b>
<b>Prostownik neonowy . . . . .</b>	<b>298</b>
<b>Elektrochemia . . . . .</b>	<b>300</b>
<b>Ogniwa elektryczne . . . . .</b>	<b>303</b>
Ogniwa galwaniczne . . . . .	304
Polaryzacja ogniwa . . . . .	305
Ogniwo Leclanche'a . . . . .	306
Ogniwo suche . . . . .	308
Ogniwo Meidingera . . . . .	308
Ogniwo Welsona . . . . .	309
Ogniwo termoelektryczne . . . . .	310
Tabela porównawcza . . . . .	312
Łączenie ogni w baterji . . . . .	313
Łączenie szeregowo . . . . .	313
Tabela porównawcza . . . . .	315
Łączenie równoległe . . . . .	315
Łączenie mieszane . . . . .	317
Sprawność ogniwa . . . . .	319
Zadania . . . . .	320
<b>Akumulatory . . . . .</b>	<b>322</b>
Gęstość elektrolitu w akumulatorach ołowianych . . . . .	325
Oporność wewnętrzna akumulatorów ołowianych . . . . .	327
Gęstość prądu w akumulatorach ołowianych . . . . .	328
Zadanie . . . . .	329
Zwarcie akumulatora . . . . .	329

	str.
Zadanie . . . . .	330
Pojemność akumulatora . . . . .	331
Zadania . . . . .	333
Energja użyteczna akumulatora . . . . .	333
Zadania . . . . .	334
Napięcie na zaciskach akumulatora ołowianego	336
Zadanie . . . . .	338
Sprawność akumulatora . . . . .	339
Sprawność pojemnościowa . . . . .	340
Sprawność energetyczna . . . . .	340
Zadanie . . . . .	340
Ładowanie akumulatorów przenośnych . . . . .	341
Ładowanie i wyładowanie akumulatorów stałych	343
Obsługa akumulatorów ołowianych . . . . .	346
Ładowanie i wyładowywanie akumulatorów . . . . .	346
Transport akumulatorów przenośnych . . . . .	349
Akumulatory żelazo - nikłowe Edisona . . . . .	350
Ładowanie i wyładowanie akumulatorów zasadowych	351
Obsługa akumulatorów zasadowych . . . . .	353
<b>Lampy i wyłączniki . . . . .</b>	<b>354</b>
Lampy łukowe . . . . .	354
Włączanie lamp łukowych do obwodu . . . . .	356
Żarówki . . . . .	357
Włączanie lamp żarowych do obwodu . . . . .	358
Zadanie . . . . .	359
Bezpieczniki . . . . .	360
Bezpieczniki topikowe . . . . .	360
Bezpieczniki przepięciowe . . . . .	362
Wyłączniki . . . . .	364

## I. WIADOMOŚCI WSTĘPNE.

Przy studjowaniu elektrotechniki będziemy się opierać na działaniu sił, to też rozpatrzemy na wstępie podstawowe wiadomości z nauki o siłach, zwanej *mechaniką*. Jednocześnie przypomnimy sobie układy jednostek wielkości fizycznych i ich wymiary.

**Spoczynek i ruch.** Ciało, którego wszystkie punkty zachowują stałe położenie względem przedmiotów uważanych za nieruchome, znajduje się w stanie **spoczynku względnego**; przytem siły, działające na takie ciało muszą być w równowadze. Ciało jest w **ruchu względnym**, jeżeli położenie jego punktów względem przedmiotów uważanych za nieruchome ulega zmianie, przyczem siły, działające na to ciało, mogą być lub nie być w równowadze. Np. człowiek poruszający się w wagonie kolejowym idącego pociągu jest w stanie ruchu względem ścian i okien wagonu, które są względem siebie w stanie spoczynku; ściany i okna wagonu są w stanie ruchu względem tych przedmiotów, względem których jest w stanie ruchu cały pociąg, t. j. względem stacji kolejowych, słupów telegraficznych i t. p.

**Droga, prędkości i przyśpieszenia.** Gdy ciało jest w ruchu, kolejne położenia każdego jego punktu tworzą linje ciągłe, zwane **torami**. Określony odcinek

toru, przebyty przez poruszający się po nim punkt nazywamy **drogą**. Ciało, będące w ruchu (określony punkt tego ciała), przebyć może jedną i tę samą drogę po pewnym torze wciągu krótszego lub dłuższego czasu, dla zupełnej więc znajomości ruchu tego ciała wprowadzamy wielkość fizyczną, określającą stosunek pomiędzy drogą i czasem, wciągu którego została ona przebyta. Wielkość tę nazywamy **prędkością** ciała, a miarą jej jest droga przebyta przez ciało w jednostkę czasu. Według tej definicji, jeżeli wciągu czasu  $t$  ciało przebyło drogę  $l$  to szybkość  $v$  będzie:

$$v = k \cdot \frac{l}{t}$$

gdzie  $k$  — współczynnik proporcjonalności, zależny od wyboru jednostek do mierzenia  $l$ ,  $v$ ,  $t$ .

Prędkość ciała, poruszającego się po pewnym torze, może w każdym jego punkcie ulegać zmianie. W tym wypadku stosunek drogi do czasu, w którym została ona przebyta daje jedynie pojęcie o średniej prędkości ciała w danym okresie czasu. Jeżeli okres ten będziemy zmniejszali do nieskończoności, to przejdziemy do pojęcia chwili i prędkości w danej chwili (chwili nadajemy znaczenie analogiczne do pojęcia punktu w geometrii t. j. uważamy, że nie posiada żadnej rozciągłości).

Niech ciało w chwili  $t_1$  posiada prędkość  $v_1$ , a w chwili  $t_2$  — prędkość  $v_2$ ; różnicę  $v_2 - v_1$  nazywamy przyrostem (dodatnim lub ujemnym) prędkości. Stosunek przyrostu prędkości do czasu, w którym zaszedł, nazywamy **przyśpieszeniem**.

Oznaczając przyśpieszenie przez  $a$ , mamy:

$$a = k \cdot \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$$

gdzie  $k$  — współczynnik proporcjonalności, zależny od wyboru jednostek do mierzenia  $a$ ,  $v$ ,  $t$ .

Jeżeli przyspieszenie ulega zmianie z biegiem czasu, to możemy mówić o przyspieszeniu **średnim** wciągu pewnego okresu czasu lub o przyspieszeniu w danej chwili.

Nadal we wszystkich wzorach nie będziemy stosowali współczynnika proporcjonalności  $k$ , zakładając, że zawsze jest on równy 1, czyli że wszystkie wielkości wchodzące w skład wzoru są wymierzone odpowiednio dobranymi jednostkami, czyli należącymi do tego samego układu jednostek.

Badając ruch ciała, obieramy pewną chwilę, od której zaczynamy rachować czas i pewien punkt, uważany za początek toru.

Tor, prędkość i przyspieszenie charakteryzują ruch ciała, a mianowicie, w zależności od toru rozróżniamy **ruch prostoliniowy** i **krzywoliniowy**; w zależności od toru i prędkości — **ruch postępowy** i **obrotowy**. Ruchem postępowym nazywamy taki ruch, przy którym tory wszystkich punktów ciała są równoległe, a prędkości równe. Dla zbadania takiego ruchu wystarczy rozpatrzeć ruch jednego punktu ciała np. środka ciężkości. Przy ruchu obrotowym torami wszystkich punktów, nie leżących na osi obrotu, są koła położone w płaszczyznach prostopadłych do osi, a prędkości linjowe poszczególnych punktów zależą od ich odległości od osi obrotu.

Ruch pod względem prędkości może być jednostajny i zmienny. O ile wielkość drogi zmienia się proporcjonalnie do czasu zużytego przez ciało dla przebycia tej drogi, to taki ruch ciała nazywamy **jednostajnym**. Dla dowolnego czasu  $t$  wielkość drogi  $l$ , przebytej przez ciało w ruchu jednostajnym, możemy określić ze wzoru:

$$l = l_0 + v t$$

gdzie  $l_0$  — droga przebyta przez ciało do chwili, w której zaczęliśmy obserwować jego ruch,  $v$  — prędkość ciała podczas obserwacji (w czasie od  $O$  do  $t$ ). Prędkość jest tu wielkością stałą.

Przy ruchu **zmiennym** prędkość ciała nie pozostaje stałą, lecz ulega wciąż zmianom. Ruch zmienny z prędkością rosnącą nazywa się ruchem **przyśpieszonym**. Np. pociąg odchodzący ze stacji. Ruch zmienny z prędkością malejącą nazywamy **opóźnionym**. Np. pociąg przychodzący do stacji. O ile przyrosty (dodatnie lub ujemne) prędkości są proporcjonalne do czasu, to taki zmienny ruch ciała nazywamy **jednostajnie zmiennym**. Zależnie od tego, czy przyrosty są dodatnie, czy ujemne ruch nazywamy **jednostajnie przyśpieszonym** lub **jednostajnie opóźnionym**.

Dla dowolnego momentu czasu  $t$ , wielkość prędkości ciała możemy określić ze wzoru:

$$v = v_0 + a t$$

gdzie  $v_0$  — wielkość prędkości posiadanej przez ciało w początkowej chwili obserwacji (jeżeli ciało było w stanie spoczynku to  $v_0 = 0$ ),  $a$  — przyśpieszenie, które posiadało ciało podczas obserwacji (w czasie od  $O$  do  $t$ ); jest tu ono wielkością stałą; znak plus stosujemy, kiedy odbywał się ruch jednostajnie przyśpieszony, minus — kiedy odbywał się ruch jednostajnie opóźniony.

Dla określenia w powyższym wypadku wielkości drogi, którą ciało przebyło ruchem jednostajnie zmiennym, znajdujemy **prędkość średnią**, jaką posiadało ciało pomiędzy chwilą początkową  $O$  (prędkość  $v_0$ ) oraz chwilą końcową obserwacji  $t$  (prędkość  $v_0 + a t$ ); będzie ona:

$$v = \frac{v_0 + v_0 + a t}{2} = v_0 + \frac{a t}{2}$$



Gdyby ciało poruszało się ruchem jednostajnym z powyższą prędkością, to przeszłoby w tym samym czasie (od  $O$  do  $t$ ) tę samą drogę, jak i poruszając się ruchem jednostajnie zmiennym, na podstawie którego wyprowadziliśmy szybkość średnią. Drogę więc przy ruchu jednostajnie zmiennym, znajdziemy, posługując się wzorem dla drogi przy ruchu jednostajnym, podstawiając w nim zamiast  $v$  prędkość średnią pomiędzy punktami początkowym i końcowym:

$$l = l_0 + \left( v_0 + \frac{a t}{2} \right) \cdot t = l_0 + v_0 t + \frac{a t^2}{2}$$

O ile do chwili początkowej ciało nie przebyło żadnej drogi t. j.  $l_0 = 0$  i szybkość jego w tym momencie  $v_0 = 0$ , to wielkość przebytej drogi przy ruchu jednostajnie przyspieszonym będzie:

$$l = \frac{a t^2}{2}$$

czyli przy ruchu jednostajnie przyspieszonym, droga przebyta jest proporcjonalna do kwadratu czasu. Przy swobodnym spadaniu ciał, w powyższym równaniu, drogę  $l$  zastąpimy przez wysokość  $h$ , z której spada ciało, przyspieszenie  $a$  będzie w tym wypadku równało się przyspieszeniu ziemskiemu  $g = 9,81$  m/sek. Wielkość drogi przebytej ruchem jednostajnie przyspieszonym dla swobodnie spadających ciał będzie:

$$h = \frac{g t^2}{2}; t = \sqrt{\frac{2 h}{g}}$$

Prędkość w dowolnym momencie czasu określimy ze wzoru:

$$v = g t = \sqrt{2 g h}$$

**Prawa Newtona. Pierwsze prawo Newtona czyli prawo bezwładności.** Punkt materjalny pozostaje w stanie spoczynku lub ruchu prostoliniowego i jednostajnego, jeżeli nie działa nań żadna siła. Tę własność ciał nazywamy **bezwładnością**.

**Drugie prawo Newtona czyli prawo siły.** Siła, działająca na punkt materjalny, udziela mu przyspieszenia, które jest z nią zgodne co do kierunku i proporcjonalne do niej co do wielkości.

Prawo to może być wyrażone wzorem:

$$F = ma$$

gdzie  $F$  — wielkość siły działającej na ciało,  $m$  — masa ciała,  $a$  — przyspieszenie, które to ciało otrzymuje pod działaniem siły  $F$ .

Widzimy, że pojęcie przyspieszenia wiąże się nierozdzielnie z pojęciem siły. Ruch ciała spadającego swobodnie jest jednostajnie przyspieszonym, stąd wynika, że ciężar ciała jest siłą stale działającą. Przyspieszenie ciał spadających oznacza się literą  $g$  i zowie się **przyspieszeniem ciężkości** czyli **przyspieszeniem ziemskim**. W powyższym wzorze siła będzie równoznaczna z ciężarem ciała.

**Trzecie prawo Newtona czyli prawo akcji i reakcji.** Siły, które dwa punkty materjalne lub dwa ciała wywierają jedno na drugie, mają wspólną linię działania, są równe i odwrotnie skierowane. Jako przykład może służyć odskok broni przy wystrzale, podnoszenie ciężaru i t. p.

**Praca.** Praca jest to rezultat działania siły wzdłuż pewnej drogi. Zależność wielkości pracy od siły i drogi możemy wyrazić zapomocą wzoru:

$$A = F l \cdot \cos \alpha$$

gdzie  $l$  — droga, po której porusza się dane ciało,  $F$  — siła, która działa na to ciało pod kątem  $\alpha$  do jego toru (rys. 1). W wypadku, gdy siła działa w kierunku toru wykonana praca:

$$A = Fl$$

ponieważ  $\alpha = 0$ ,  $\cos \alpha = 1$ ; w wypadku, gdy siła działa w kierunku prostopadłym do kierunku toru, wykonana praca:

$$A = 0$$

ponieważ  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\cos \alpha = 0$ .

**Moc (dzielność).** Siła robocza jest tem pożyteczniejsza im prędszej pracuje t. j. im większą pracę wykona w danym czasie, dlatego też wprowadzamy nowe pojęcie — **mocy** czyli **dzielności**, wskazujące jak wielka praca została wykonana w jednostkę czasu. Moc może być wyrażona przez wzór:

$$P = \frac{A}{t}$$

gdzie  $P$  — moc,  $A$  — praca,  $t$  — czas, wciągu którego została ona wykonana.

**Podział jednostek na zasadnicze i pochodne.** Zbiór wszystkich jednostek przyjętych według pewnej określonej zasady do mierzenia wielkości fizycznych nazywamy **układem jednostek**. W każdym układzie istnieją jednostki, które są dowolnie wybrane i są jakby podstawą do budowy całego układu. Jednostki te nazywamy **jednostkami zasadniczymi**. Wszystkie inne w danym układzie nazywamy **jednostkami pochodnymi**; są one utworzone z zasadniczych według najprostszych zależności, istniejących pomiędzy jednostkami pochodnymi i zasadniczymi.

**Układ bezwzględny C. G. S. jednostek i wymiar jednostek pochodnych.** W układzie bezwzględnym C. G. S. przyjmujemy trzy jednostki jako zasadnicze:

1) **Długości ( $L$ )** — centymetr.

Centymetr = 0,01 metra. (Wzorec metra, wykonany z platyny i irydu, znajduje się w międzynarodowym biurze miar w Paryżu).

2) **Masy ( $M$ )** — gram, tysięczna część kilograma, który stanowi masę metalowego cylindra wzorcowego przechowywanego również w Paryżu. W przybliżeniu kilogram stanowi masę wody w objętości 1 litra przy 4° C.

3) **Czasu ( $T$ )** — sekunda =  $\frac{1}{24.60.60} = \frac{1}{86400}$   
część średniej doby słonecznej.

Układ nosi nazwę układu C. G. S. inaczej układu „centymetr - gram - sekundowego”.

Na podstawie tych trzech jednostek określamy wymiary wszystkich wielkości fizycznych.

Wymiarem nazywamy zależność algebraiczną jednostki pochodnej od jednostek zasadniczych po odrzuceniu wszystkich współczynników. Wymiary jednostek znacznie ułatwiają przejście od jednego układu miar do innego.

W ten sposób możemy łatwo wyprowadzić jednostki pochodne w układzie C. G. S. i ich wymiary dla: prędkości, przyspieszenia, siły, pracy i mocy, jak podano w tabeli na str. 9.

**Jednostki absolutne i praktyczne.** Przejdziemy obecnie do mierzenia tych wielkości fizycznych, dla których wyżej wyprowadziliśmy jednostki w układzie C. G. S. Mierzenie tych wielkości jest konieczne tak dla celów naukowych, jak i dla celów praktycznych

Wielkości fizyczne	Zależność wielkości fizycznych pomiędzy sobą	Jednostki pochodne w układzie C. G. S.	Wymiar wielkości fizycznych
Długość . . . .	$l$	cm.	$L$
Masa . . . . .	$m$	gr.	$M$
Czas . . . . .	$t$	sek.	$T$
Prędkość . . . .	$v = \frac{l}{t}$	$\frac{\text{cm.}}{\text{sek.}}$	$L T^{-1}$
Przyspieszenie.	$a = \frac{v}{t}$	$\frac{\text{cm.}}{\text{sek.}^2}$	$L T^{-2}$
Siła . . . . .	$F = m \cdot a$	gr. $\frac{\text{cm.}}{\text{sek.}^2}$	$L M T^{-2}$
Praca . . . . .	$A = F \cdot l$	gr. $\frac{\text{cm.}^2}{\text{sek.}^2}$	$L^2 M T^{-2}$
Moc . . . . .	$P = \frac{A}{t}$	gr. $\frac{\text{cm.}^2}{\text{sek.}^3}$	$L^2 M T^{-3}$

w życiu codziennem. Będzie ono polegało na porównaniu ze sobą wielkości jednorodnych — t. j. wielkości mierzonych i wielkości przyjętych za jednostkę miary. Jednostki używane wyłącznie w nauce nazywają się bezwzględniemi, używane w życiu codziennem — praktyczniemi.

Wszystkie trzy jednostki zasadnicze układu C. G. S. używane są do celów naukowych; praktyczne jednostki długości, masy, czasu są podane na str. 12. Przy wyprowadzaniu jednostek bezwzględnych i praktycznych będziemy opierać się, jak wyżej wspomnieliśmy, na wzorach matematycznych, określających zależność pomiędzy poszczególnymi wielkościami.

1) **Absolutna jednostka prędkości**, jak widzimy ze

$$\text{wzoru: } v = \frac{l}{t}$$

jest to prędkość jaką posiada ciało przebywające drogę 1 cm. w 1 sek.

**Praktyczną jednostką prędkości** jest: kilometr na godzinę lub mila morska na godzinę.

2) **Absolutną jednostką przyspieszenia**, jak widzimy

$$\text{ze wzoru: } a = \frac{v}{t}, \text{ jest przyspieszenie jakie posiada}$$

ciało, jeżeli jego prędkość wzrasta lub maleje w 1 sekundę o jednostkę prędkości.

**Praktyczną jednostką przyspieszenia** jest przyspieszenie ziemskie  $g = 9,81 \text{ m/sek}^2$ . Jest to wielkość średnia, ponieważ naogół przyspieszenie ziemskie zależy od szerokości geograficznej: na biegunie  $g = 9,83 \text{ m/sek}^2$ , na równiku  $g = 9,78 \text{ m/sek}^2$ .

3) **Absolutną jednostką siły**, jak widzimy ze wzoru:  $F = mp$ , jest siła, która masie 1 gr. nadaje jednostkę

przyspieszenia t. j.  $1 \frac{\text{cm.}}{\text{sek.}^2}$ . Taka absolutna jednostka

siły nazywa się dyną. Siła milion razy większa nazywa się megadyną.

**Praktyczną jednostką siły** jest kilogram = 1000.981 gr.  $\text{cm./sek.}^2 = 981000 \text{ dyn.}$ , jeżeli przyjmiemy przyspieszenie ziemskie  $g = 981 \text{ cm./sek}^2$ .

4) **Absolutna jednostka pracy**; jak widzimy ze wzoru:  $A = F l$ , jest to praca jaką wykona siła 1 dyny wzdłuż drogi 1 cm., o ile kierunek siły i drogi jest zgodny. Taką absolutną jednostką pracy nazywamy ergiem.

Praktyczną jednostką pracy jest dżaul  $= 10^7$  ergów; częściej używaną praktyczną jednostką pracy jest kilogramometr  $= 981 \cdot 10^5$  dyn. cm.  $= 9,81 \cdot 10^7$  ergów  $= 0,981$  dżauli; 1 dżaul  $\cong 0,102$  kgm.

5) Absolutną jednostką mocy, jak widzimy ze wzoru:  $P = \frac{A}{t}$ , jest 1 erg/sek.

Praktyczną jednostką mocy jest watt lub koń mechaniczny (*K. M.*)

1 watt  $= 1$  dżaul/sek.  $= 10^7$  erg/sek.

1 kilowatt  $= 1000$  watów  $= 1000$  dżauli/sek.  $= 1,36$  *K. M.*

1 *K. M.*  $= 75$  kgm/sek.  $= 75 \cdot 981000 \cdot 100$  erg/sek.  $= 75 \cdot 9,81$  dżauli/sek.  $= 736$  watów.

W elektrotechnice najczęściej stosowana jest jednostka pracy zwana kilowatt — godziną; 1 kilowatt — godzina  $= 1000$  watt. 3600 sek.  $= 36 \cdot 10^5$  watt. sek.  $= 36 \cdot 10^5$  dżauli.

**Energja.** Pojęcie energii zaliczamy do najważniejszych pojęć fizyki. Nakręcona sprężyna zegarowa, wzniesione na pewną wysokość ciało, para w kotle parowym, mogą wykonać w odpowiednich warunkach pracę; mówimy, że ciała te posiadają pewien zasób energii. Zatem energję możemy określić jako zdolność ciała do wykonania pracy. Kiedy ciało wykonyuje pracę, zapas energii zawartej w nim zmniejsza się.

**Rodzaje energii.** Rozróżniamy następujące rodzaje energii: energja mechaniczna (leżąca kula karabinowa, wiatr, spadająca z pewnej wysokości woda), energja cieplna (ruch cząstek ciała), energja elektryczna (prąd

Tabela jednostek absolutnych i praktycznych.

Wielkości fizyczne	Jednostki absolutne	Jednostki praktyczne
Długość ( $l$ )	centymetr	metr, kilometr, mila morska
Powierzchnia ( $S$ )	centymetr kwadratowy	metr kwadratowy, kilometr kwadr. i mila morska kwadratowa
Objętość ( $V$ )	centymetr sześcienny	metr sześcienny
Czas ( $t$ )	sekunda	minuta, godzina, doba
Masa ( $m$ )	gram	kilogram, tona = 1000 kg.
Prędkość ( $v$ )	centymetr/sek.	kilometr / godzina, mila morska / godzina
Przyśpieszenie ( $a$ )	centymetr/sek. <sup>2</sup>	przyśpieszenie ziemskie
Siła ( $F$ )	dyna	kilogram = 981000 dyn tona = 1000 kg.
Praca ( $A$ )	erg	dżaul = 107 ergów = = $\frac{1}{9.81}$ kgm. = 0.102 kgm.
Moc ( $P$ )	erg/sek.	watt = 1 dżaul/sek.; kilowatt = 1000 wattów K. M. = 736 wattów K. M. = 75 kgm'/sek.



elektryczny), energia promienista (promienie w eterze) i energia magnetyczna (przyciąganie lub odpychanie się magnesów).

**Energja kinetyczna i potencjalna.** Każde ciało, posiadające pewien zasób energii tego lub innego rodzaju, może mieć ją w dwóch postaciach: **energji kinetycznej** czyli energii ruchu, przejawiającej się w sposób widoczny i **energji potencjalnej** czyli energii położenia, przejawiającej się w sposób niewidoczny.

Obserwując te dwie postacie energii zauważymy, że w większości wypadków ciała mają dążność do przekształcenia posiadanej energii potencjalnej w energję kinetyczną np. dążność energii elektrycznej naładowanego kondensatora do przebicia dielektryka.

Przy połączeniu przewodnikiem okładek kondensatora, energia potencjalna przekształci się w energję kinetyczną prądu elektrycznego, który popłynie po przewodniku łączącym okładki kondensatora.

Poucającym przykładem przekształcania się energii kinetycznej w potencjalną i odwrotnie jest wahadło (kulka zawieszona na nitce rys. 2). Jeżeli odchylimy kulkę od położenia 1 do położenia 2, wykonawszy przytem pewną pracę, nadajemy kulce pewien zasób energii. Energia ta w położeniu 2 kulki będzie w postaci potencjalnej. O ile teraz siła naszej ręki przestanie działać, kulka zacznie spadać, a jej energia potencjalna przekształca się stopniowo w energję kinetyczną i, gdy kulka osiągnie położenie 1, energia potencjalna zostanie całkowicie zamieniona w energję kinetyczną. Wskutek bezwładności kulka nie zatrzyma się w położeniu 1, lecz przejdzie w położenie 3, przekształcając stopniowo energję kinetyczną w potencjalną. W położeniu 3 kulka posiada wyłącznie energję potencjalną, zacznie więc znowu spadać t. j. dążyć do położenia 1; wskutek bezwładności przejdzie

jednak przez położenie 1 aż do położenia 2 i t. d. Ten ruch wahadła trwałby wiecznie, gdyby nie było tarcia nitki w punkcie zawieszenia i oporu powietrza, na pokonanie których zużywa się za każdym wahnięciem część energii kulki.

W rzeczywistości ruch kulki około punktu 1 będzie ruchem drgającym tłumionym czyli gasnącym (o ile rozpatrywać małe wychylenia kulki).

Jeżeli w układzie spórzędnych prostokątnych odłożymy na osi odciętych czas zużyty przez kulkę na przebycie drogi od położenia 1 do 2, 2—1, 1—3, 3—1, i t. d., na osi rzędnych odpowiednie do chwili wielkości odchylenia ( $l$ ) kulki od położenia 1, odkładając przytem odchylenie kulki w lewą stronę w górę od osi odciętych, w prawą—w dół, to graficznie ruch drgający tłumiony kulki będzie się przedstawiał, jak na rys. 3a. Analogiczny wykres otrzymalibyśmy zaopatrzywszy kulkę w ołówek i przesuwając pod nią papier w czasie jej wahan. Długość łuku 1—2 pomiędzy największym wychyleniem, a położeniem równowagi kulki nazywamy amplitudą, czas ( $AL$ ) potrzebny, aby kulka przeszła od położenia 1 do położenia 2, a następnie przez położenie 1 do położenia 3 i wróciła ponownie do położenia 1 nazywamy okresem wahań.

Podczas całego trwania ruchu drgającego gasnącego kulki, wielkość amplitudy będzie stopniowo zmniejszać się. Wielkość okresu jednakże pozostanie jednakową, gdyż ze zmniejszeniem się drogi, przebytej przez kulkę, zmniejsza się i jej szybkość. Czas zaś przebycia drogi całkowitej od położenia 1 przez 2, 3 do 1 pozostaje niezmiennym.

Analogiczne zjawisko będziemy mieli z okresem drgań elektrycznych, w obwodach drgających gasnących w radjotechnice.

Gdybyśmy, wykonywując pewną pracę podczas ruchu wahadłowego, np. zapomocą sprężyny, uzupełniali ciągle traconą na pokonanie oporu energję kulki, podtrzymując w ten sposób jednakowe odchylenia jej od położenia 1 w obie strony, mielibyśmy ruch **drgający niegasnący** przedstawiony graficznie na rys. 3b.

Stosunek dwóch sąsiednich wychyleń kulki w ruchu gasnącym jest wielkością stałą:

$$\frac{KL}{AB} = \frac{MN}{KL} = \frac{PS}{MN} = \text{constans.}$$

Stosunek ten charakteryzuje wielkość tłumienia ruchu drgającego i jest wielkością  $< 1$ ; przy ruchu niegasnącym stosunek ten równa się 1.

**Przekształcenie energii.** W powyższych przykładach z kondensatorem i wahadłem widzieliśmy przekształcanie postaci energii, przyczem sam rodzaj energii nie ulegał zmianie. W praktyce spotykamy się często i z innym zjawiskiem, mianowicie przenoszeniem energii na odległość i przekształceniem jednego rodzaju energii w inny, do czego służą rozmaite maszyny; np. w palenisku kotła energia chemiczna węgla zamienia się na energję cieplną pary wodnej, ta znowu w maszynie parowej zostaje przekształcona na energję mechaniczną, dzięki której uzyskujemy w prądnicy energję elektryczną; ta ostatnia, przeniesiona przy pomocy przewodów do rozmaitych miejsc, ulega przemianie na energję mechaniczną (obrabiarki), świetlną (lampy), cieplną (grzejniki) i t. d. Naogół można powiedzieć, że wszystkie rodzaje energii mają dążność do przejścia w energję cieplną, a ta ostatnia do równomiernego rozdzielenia się, a następnie wypromieniowania.

**Zasada zachowania energii.** Jak wyjaśniliśmy powyżej energia może przechodzić z jednego rodzaju

w drugi, ale we wszystkich wypadkach zachowuje się w układzie odosobnionym w niezmienniej ilości — jest niezniszczalna. Prawo zachowania energii możemy wypowiedzieć w następujący sposób:

Całkowity zasób energii w jakimkolwiek układzie ciał nie może ani zwiększyć się, ani zmniejszyć wskutek wzajemnych działań między częściami układu, może jednakowoż przybierać którąkolwiek z postaci w jakich energia się przejawia. Energia układu może zwiększyć się tylko kosztem energii otrzymanej z zewnątrz układu.

Ilekroć układ wydaje energję na zewnątrz, bądź to przez wykonanie pracy, przez wydanie ciepła, przez promieniowanie albo w jakikolwiek bądź inny sposób — zasób energii zawartej w nim zmniejsza się o wartość energii wydanej.

Układ materjalny, który nie zmienia się, nie wyczerpuje w ten czy ów sposób, nie może też wydawać z siebie energii, znaczy to, że energii nie można z niczego stworzyć czyli niemożliwem jest **perpetuum mobile**.

**Mechaniczny równoważnik ciepła.** Jak zaznaczyliśmy uprzednio wszystkie rodzaje energii mają dążność do przekształcenia się w energję cieplną, przeto zachodzi często potrzeba wiedzieć, jaką ilość energii cieplnej wytworzy się w każdym poszczególnym wypadku.

Na podstawie licznych doświadczeń stwierdzono, że 426,7 kgm., zamienione całkowicie w energję cieplną, wytworzą 1 kaloryę kilogramową ciepła t. j. ilość potrzebną do podniesienia temperatury 1 kg. wody o  $1^{\circ}\text{C}$ , od  $14,5^{\circ}\text{C}$  do  $15,5^{\circ}\text{C}$ . 426,7 kgm. nazywamy **mechanicznym równoważnikiem ciepła**. Odwrotnie,

do wytworzenia 1 kgm. mechanicznej pracy musimy zużyć  $\frac{1}{426,7}$  Kal. ciepła. Ilość ta nazywa się **cieplnym równoważnikiem pracy**.

Przy przekształceniu energii elektrycznej w energję cieplną obliczamy ilość otrzymanej energii cieplnej w małych kalorjach (0,001 Kal.), mnożąc pracę elektryczną, obliczoną w dżaulach, przez 0,24 t. j.:

1 dżaul = 0,24 kal. (kalorie gramowe),

1 kilowatt—godz. = 860 Kal. (kalorie kilogramowe).

### Z a d a n i a.

1. Jaką prędkość nada siła 100 gramów, działająca przez 5 sekund, ciału o masie 50 gramów?

Przyspieszenie, które ma ciało pod wpływem działania tej siły:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{100 \cdot 981}{50} = 1962 \text{ cm/sek.}^2$$

Prędkość ciała po upływie 5 sek.:

$$v = a t = 1962 \cdot 5 = 9810 \text{ cm/sek.}$$

2. Wodospad dostarcza 90000 ltr/min. wody spadającej z wysokości 5 m. Jaka jest dzielność wodospadu?

Praca wykonana przez wodospad w przeciągu 1 min.:

$$a = Fl = 90000 \cdot 5 = 450000 \text{ kgm.}$$

$$\text{dzielność wodospadu: } P = \frac{A}{t} = \frac{450000}{60 \cdot 75} = 100 \text{ KM.}$$

3. Koń ciągnie z siłą 50 kg. wagon po torze kolejowym na przestrzeni 1 klm. Obliczyć pracę wyko-



naną przez konia przy przesuwaniu wagonu po torze kolejowym, jeżeli kierunek siły pociągowej konia tworzy z kierunkiem toru kolejowego kąt  $60^\circ$ .

Praca wykonana przez konia przy przesuwaniu wagonu po torze kolejowym:

$$A = Fl \cdot \cos 60^\circ = 50 \cdot 1000 \cdot 0,5 = 25000 \text{ kgm.}$$

Gdyby siła pociągowa konia była skierowana wzdłuż toru kolejowego, wówczas koń mógłby wykonać pracę dwa razy większą:

$$A = Fl = 50 \cdot 1000 = 50000 \text{ kgm.}$$

W obu wypadkach siła pociągowa konia i wielkość przesunięcia wagonu będą jednakowe, lecz w wypadku kiedy kierunek siły tworzy z kierunkiem toru kolejowego kąt  $60^\circ$ , tylko połowa siły pociągowej konia będzie użyta do posuwania wagonu, druga połowa tej siły działa szkodliwie, starając się przesunąć wagon w kierunku prostopadłym do toru, co wywołuje dodatkową siłę tarcia kół wagonu o szyny kolejowe, na pokonanie której na drodze 1 klm. koń wykonuje bezużyteczną pracę:

$$A = Fl = 25 \cdot 1000 = 25000 \text{ kgm.}$$

4. Kamień, spadający z góry, dosięga ziemi z szybkością 49 m/sek. Obliczyć z jakiej wysokości kamień spada.

Czas, w przeciągu którego kamień spadał:

$$t = \frac{v}{g} = \frac{49}{9,81} = 5 \text{ sek.}$$

Wysokość, z której kamień spadał:

$$h = \frac{gt^2}{2} = \frac{9,81 \cdot 25}{2} = 122,625 \text{ m.}$$

5. Parowa maszyna o mocy 10 K. M., której współczynnik wydajności jest 40%, służy do uruchamiania prądnicy, której współczynnik wydajności jest 90%. Ile ciepła otrzymamy w ciągu 5 minut, jeżeli cała energia elektryczna dostarczana przez tę prądnicę przekształca się w ciepło?

Moc energii elektrycznej otrzymanej z prądnicy:

$$P = 10 \cdot 0,4 \cdot 0,9 \cdot 736 = 2649,6 \text{ dżaul/sek.}$$

Ilość ciepła otrzymana w ciągu 5 min.:

$$Q = 0,24 \cdot 2649,6 \cdot 5 \cdot 60 = 381542 \text{ kal.}$$

6. Określić z powyższego zadania, ile ciepła w ciągu pół godziny otrzymamy, jeżeli energię mechaniczną otrzymaną z maszyny parowej przekształcimy w ciepło?

Moc energii mechanicznej otrzymanej z maszyny parowej:

$$P = 10 \cdot 0,4 \cdot 75 = 300 \text{ kgm./sek.}$$

Ilość ciepła otrzymana w ciągu pół godziny:

$$Q = \frac{300 \cdot 60 \cdot 30}{427} = 2529 \text{ Kal.}$$

W następnych rozdziałach rozpatrywać będziemy zjawiska elektryczne. Zjawiska te obejmują dwa zasadnicze działy:

a) **elektrostatyka**, która rozpatruje zjawiska elektryczne zachodzące z elektrycznością znajdującą się na powierzchni ciał w stanie spoczynku.

b) **elektrodynamika**, rozpatrująca zjawiska elektryczne, zachodzące z elektrycznością znajdującą się w stanie ruchu.

## II. ELEKTROSTATYKA.

**Elektryzowanie przez tarcie.** Starożytni Grecy zauważyli, że bursztyn potarty o wełnianą materję posiada zdolność przyciągania do siebie ciał lekkich. Późniejsze badania wykazały, że wszystkie ciała nabywają tej własności po potarciu, o ile tylko doświadczenie przeprowadzać w przyjaznych do tego warunkach. Przy pocieraniu zużywamy pewną ilość energji mechanicznej, która zostaje zamieniona na energję **elektryczną** (od greckiego elektron — bursztyn), przejawiającą się w zdolności do wykonania pracy przez ciało naelektryzowane.

**Złe i dobre przewodniki.** Początkowe badania nad zjawiskami elektrycznymi doprowadziły do błędnego wniosku, że nie wszystkie ciała można elektryzować przez tarcie; np. kawałek rurki mosiężnej potartej o jedwab nie wykazuje żadnych własności elektrycznych. Jednakże i w tym wypadku na rurce powstaje elektryczność, lecz odrazu spływa przez rękę i ciało do ziemi. Przekonać się o tem możemy, osadzając rurkę na szklanym trzonku: po potarciu o jedwab będzie ona przyciągała lekkie ciała tak samo jak bursztyn. Możemy więc wszystkie ciała podzielić na dwie zasadnicze grupy: takie, które zatrzymują elektryczność tylko w miejscu potarciem i takie, na



których elektryczność rozchodzi się po całej ich powierzchni. Pierwsze nazwano **złemi przewodnikami**, izolatorami lub **dielektrykami**, drugie — **dobremi przewodnikami**. Do dobrych przewodników zaliczamy metale, węgiel, roztwory kwasów, soli, ziemię wilgotną, ciała organiczne i wodę zwykłą. Złemi przewodnikami albo izolatorami są: szkło, lak, siarka, ebonit, parafina, stearyna, jedwab, suche powietrze i chemicznie czysta woda. Dobre przewodniki służą do przewodzenia względnie do gromadzenia na nich elektryczności, złe do odosabniania elektryczności, znajdującej się na powierzchniach dobrych przewodników. Drzewo należy do półprzewodników i jest tym gorszym przewodnikiem im jest suchsze.

**Elektryzowanie przez zetknięcie.** Jeżeli zetkniemy dwa ciała dobrze przewodzące elektryczność, jedno będące w stanie elektrycznie neutralnym, a drugie naelektryzowane, wtedy elektryczność rozdzieli się pomiędzy te ciała w stosunku zależnym od ich powierzchni; po rozłączeniu ich okaże się, że jedno zyskało pewną ilość elektryczności, a drugie część jej utraciło we wszystkich punktach swej powierzchni. Gdy ciała nie są przewodnikami, przybytek i strata elektryczności nastąpi tylko w punktach zetknięcia.

**Dwa rodzaje elektryczności.** Jak wykazały liczne doświadczenia istnieje elektryczność dwóch rodzajów, powstająca na szkle potartym amalgamowaną skórą, nazwana **dodatnią (+)**, oraz elektryczność, którą zyskuje żywica potarta o wełnianą materję — nazwana **ujemną (-)**. Przy wzbudzaniu elektryczności przez tarcie, elektryzują się jednocześnie oba ciała, przy czem jedno zyskuje elektryczność dodatnią, drugie równą jej ilość elektryczności ujemnej. Możemy się o tem przekonać przez ponowne zetknięcie obu ciał;

wówczas ich elektryczności neutralizują się i ciała nie wykażą żadnego stanu naelektryzowania. Z zjawiska tego wynika jednocześnie prawo dodawania elektryczności.

Pierwszą teorię zjawisk elektrycznych podał Benjamin Franklin. Według niej w każdym ciele obojętnem elektrycznie znajduje się pewna normalna ilość płynu elektrycznego nieważkiego, którego cząstki odpychają się wzajemnie. Oddziaływanie dwóch ciał, naelektryzowanych normalnie, nie przejawia się nazewnątrz, albowiem równe co do natężenia, a przeciwnie skierowane działania materji i związanego z nią płynu elektrycznego znoszą się wzajemnie. Dopiero gdy przy potarciu dwóch różnorodnych ciał nastąpi przepływ płynu elektrycznego z jednego ciała do drugiego, a więc gdy jedno z nich będzie posiadać go ponad normę, drugie — poniżej normy, działanie to stanie się widoczne. Według nowych poglądów co do istoty elektryczności, każdy atom materji składa się z jądra, obdarzonego elektrycznością dodatnią i jednego lub kilku elektronów ujemnych, krążących dokoła niego, w sposób przypominający układ słoneczny. Ilości elektryczności dodatniej i ujemnej w atomie obojętnym są w takim stosunku, by nie wykazywał on nazewnątrz żadnego działania elektrycznego. Dodanie względnie odjęcie pewnej ilości elektronów wywołuje stan naelektryzowania atomu. W przewodnikach elektrycznych elektrony są swobodne, jakby poodrywane od jąder atomów; w nieprzewodnikach elektrony są ściśle związane z jądrami i z trudnością dają się oddzielić, wywołując efekt świetlny w postaci iskry. Wzbudzenie elektryczności nie polega na wykorzystaniu zjawiska tarcia, lecz na zbliżeniu do siebie dwóch ciał różnorodnych, przez co umożliwia się siłom spójniowym, różnym w różnych ciałach, działanie z bliższych odległości. Pod wpływem

tych sił następuje, z jednej strony oderwanie, z drugiej związanie elektronów. Istniały dwie teorie elektryczności: unistyczna, uznająca tylko elektryczność ujemną i dualistyczna, oparta na istnieniu elektryczności obu znaków. Zasadniczo jest to jedno i to samo i, można powiedzieć, że przyjąwszy jako jednostkę elektryczności elektron ujemny, będziemy mieli elektryczność związaną z małymi masami — elektronami, i nieobecność jej związaną z dużymi masami — jądrami atomów. Warto zaznaczyć, że przy pomocy elektronów tłumaczą się wszystkie zjawiska elektryczne.

**Przyciąganie i odpychanie ciał naelektryzowanych.** Dzięki energii elektrycznej posiadanej przez ciała naelektryzowane, jak już widzieliśmy, są one w stanie przyciągać lekkie ciała. Prócz tego, zależnie od rodzajów elektryczności, któremi są te ciała naelektryzowane, możemy obserwować, że ciała naelektryzowane elektrycznością jednego rodzaju czyli **jednoimiennie** wzajemnie się odpychają, naelektryzowane elektrycznością różnych rodzajów czyli **różnoimiennie** wzajemnie się przyciągają.

Wyżej wymienione własności ciał naelektryzowanych możemy sprawdzić zapomocą wahadła elektrycznego, elektroskopu lub elektrometru, które jednocześnie służą do wykrycia stanu naelektryzowania ciał.

**Wahadło elektryczne** składa się z jednej lub dwóch małych kulek bżowych (dobrych przewodników), zawieszonych na nitkach jedwabnych (izolatorach), jak pokazano na rys. 4.

O ile laskę szklaną, potartą o skórę, zbliżymy do kulki bżowej *A*, to kulka, przyciągana do naelektryzowanej dodatnio laski, wyjdzie z położenia 1 i przejdzie do położenia 2, w którym zetknie się z laską. Dzięki temu kulka naelektryzuje się elektrycznością

tego samego znaku i odepchnie się od laski do położenia 3. Po usunięciu laski, naelektryzowana dodatnio kulka wróci ponownie do położenia 1 (rys. 4a). Jeżeli teraz laskę ebonitową, potartą o wełnę lub futro, zbliżymy do drugiej kulki bzonej *B*, to powtórzą się kolejno te same zjawiska co z kulką *A*; w tym wypadku kulka *B* zostanie naelektryzowana ładunkiem ujemnym. Obie kulki *A* i *B*, naelektryzowane różnoimiennie, zbliżone do siebie na niewielką odległość będą się przyciągać wzajemnie (rys. 4b), naelektryzowane jednoimiennie będą się odpychać (rys. 4c).

**Elektroskop** (rys. 5) składa się ze szklanej bańki i osadzonego w jej szyjce, zapomocą korka, pręta metalowego zakończonego kulką. Do jednego końca pręta przymocowane są dwa lekkie listki z dobrego przewodnika (aluminium lub odpowiednio spreparowana bibułka). Elektryczność, udzielona kulce przez zetknięcie z naelektryzowanym ciałem, rozejdzie się po powierzchni kulki, pręta i listków, wskutek czego te ostatnie, naładowane jednoimiennie, odepchną się. Jeżeli nie wiemy jakiego rodzaju elektryczność posiada naelektryzowane ciało to, chcąc się o tem przekonać, postępujemy w następujący sposób:

Dotykamy najpierw kulkę elektroskopu ciałem, którego rodzaj elektryczności chcemy poznać, nastąpi wówczas rozchylenie listków; następnie udzielamy elektroskopowi elektryczności wiadomego znaku np. dodatniej, dotykając kulkę prętem szklanym potartym o wełnę; zwiększenie rozchylenia listków dowodzi, że badane ciało posiada elektryczność dodatnią, zmniejszenie — że ujemną. Zapomocą elektroskopu możemy także przekonać się, że elektryczności powstające przy pocieraniu o siebie dwóch ciał są ilościowo równe, a co do znaków — przeciwne. W tym celu

pocieramy o siebie dwie płytki, szklaną i skórzaną, a następnie dotykamy niemi kolejno kulki elektroskopu. Przy dotknięciu jedną płytką listki się rozchyla, przy dotknięciu drugą — opadną.

Listki elektroskopu rozchyla się nie tylko po dotknięciu, ale i przy zbliżeniu do kulki ciała naelektryzowanego; elektryczność znajdująca się na kulce, pręcie i listkach w stanie obojętnym zostanie rozdzielona, a mianowicie: przeciwnego znaku, przyciągana przez elektryczność ciała, gromadzi się na kulce, tego samego znaku, odpychana — na listkach.

Jest to powstawanie elektryczności przez **wpływ lub indukcję.**

Widzimy więc, że ciało można naelektryzować trzema sposobami: przez tarcie, przez zetknięcie i przez indukcję.

**Elektrometr** (rys. 6) oparty jest na tej samej zasadzie co elektroskop i, jak wskazuje nazwa, daje możność porównywać i mierzyć w ten sposób ilościowo stany naelektryzowania ciał. Posiada on zwykle tylko jeden listek ruchomy, rolę drugiego odgrywa przedłużony pręt. Listek odchyła się tym więcej im większą ilością elektryczności naładować elektrometr. Ponieważ elektryczność, przy dotknięciu kulki ciałem naelektryzowanym, rozdziela się równomiernie pomiędzy to ciało i elektrometr, więc im więcej elektryczności posiada dane ciało, tem większa jej ilość zostanie udzielona elektrometrowi i tem większe będzie odchylenie listka. Ta zależność pomiędzy ilością elektryczności dostarczonej elektrometrowi i wychyleniem listka pozwala na odpowiednio ułożonej skali odczytać stan naelektryzowania źródła elektryczności (t. j. ciała, którego stan badamy).

Pomiar stanu naelektryzowania zapomocą elektrometru można porównać do pomiaru wysokości po-

ziomu, a więc i ilości cieczy w zbiorniku o znanym przekroju poprzecznym zapomocą szkła mierniczego, jak pokazano na rys. 6c.

Ilość wody określamy przy pomocy poznanych już wielkości, a więc masy (kg.) lub objętości (litry, cm.<sup>3</sup>); do mierzenia ilości elektryczności musimy przyjąć nową jednostkę, opartą na jej działaniach przejawiających się nazewnątrz w sposób widoczny i niezmienny, np. przez odchylenie do pewnego stopnia listka elektrometru, przyciąganie lekkich ciał z pewnej odległości i t. d.

**Ładunek elektryczny.** Francuski fizyk Coulomb pierwszy zajął się tego rodzaju pomiarami, ustalając jednostkę absolutną i praktyczną ilości elektryczności. Na jego cześć, praktyczną jednostkę ilości elektryczności nazwano **kulombem**.

Całkowitą ilość elektryczności, znajdującą się na ciele naelektryzowanem, nazywamy ładunkiem elektrycznym. Mówimy, że ciało posiada ładunek elektryczny dodatni (+) lub ujemny (—), zależnie od tego, czy jest naelektryzowane elektrycznością dodatnią, czy ujemną.

**Prawo Coulomba.** Coulomb, na podstawie rezultatów swych pomiarów, ustalił związek pomiędzy ładunkami elektrycznymi dwóch ciał naelektryzowanych, siłą ich wzajemnego przyciągania się lub odpychania i odległością pomiędzy temi ładunkami. Związek ten nosi nazwę prawa Coulomba i da się wyrazić w następujący sposób:

**Siła wzajemnego oddziaływania dwóch ładunków elektrycznych, skoncentrowanych w dwóch punktach, jest wprost proporcjonalna do iloczynu tych ładunków, odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości między nimi i działa wzdłuż prostej, łączącej**

te dwa punkty (rys. 7). Prawo Coulomba można wyrazić następującym wzorem:

$$F = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

gdzie  $F$  oznacza wielkość siły oddziaływania wyrażonej w dynach,  $Q_1$  i  $Q_2$  — ładunki elektryczne z uwzględnieniem znaków,  $r$  — odległość w centymetrach,  $\epsilon$  — wielkość zależna od rodzaju ośrodka, w którym zachodzi zjawisko, zwana **zdolnością elektryczną** lub **stałą dielektryczną**. Ścisłej, stałą dielektryczną jest stosunek zdolności elektrycznej danego ośrodka do zdolności elektrycznej powietrza. Zdolność elektryczna powietrza wymierzona względem próżni = 1,00095, różni się więc bardzo mało od zdolności — teru, (dla próżni  $\epsilon = 1$ , dla miki  $\epsilon = 8$ , dla parafiny  $\epsilon = 2$ , dla różnych rodzajów szkła  $\epsilon = 3 \div 9$ , dla powietrza  $\epsilon \cong 1$ ).

**Jednostki ilości elektryczności.** Z prawa Coulomba możemy określić jednostkę ilości elektryczności tak samo, jak określiliśmy poprzednio jednostki: siły, pracy, mocy i t. d. Na podstawie obranej jednostki ilości elektryczności wyprowadzamy nowy układ jednostek, zwany „**układem elektrostatycznym**” (*E. S. J.*). Absolutną elektrostatyczną jednostkę ilości elektryczności otrzymujemy, przyjmując we wzorze wyrażającym prawo Coulomba:

$$F = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

$Q_1 = Q_2 = 1$  E. S. J. ilości elektryczności,  $\epsilon = 1$ , t. j. zjawisko zachodzi w próżni,  $F = 1$  dyna,  $r = 1$  cm. Absolutna elektrostatyczna jednostka ilości elektryczności jest to więc taka ilość elektryczności, która

równą sobie przyciąga lub odpycha w próżni z odległości 1 cm. z siłą 1 dyny. Praktyczną jednostką ilości elektryczności jest **1 kulomb**  $= 3 \cdot 10^9$  E. S. J. ilości elektryczności. Często stosowaną w praktyce jednostką ilości elektryczności jest **ampero-godzina**, z którą następnie poznamy się dokładnie.

### Z a d a n i a.

Z jaką siłą odpychają się wzajemnie dwa różne ciała, posiadające ładunki elektryczne  $Q = 0,001$  kulomba i położone w odległości  $r = 100$  cm. od siebie w powietrzu?

Siła odpychania się tych ciał:

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = \frac{3 \cdot 10^6 \cdot 3 \cdot 10^6}{10^4} \text{ dyn} = 9 \cdot 10^8 \text{ dyn} = 917 \text{ kg.}$$

**Rozmieszczenie ładunku elektrycznego.** Jak już wspominaliśmy, ładunek elektryczny przewodnika jest rozmieszczony na całej jego powierzchni, izolatora — umiejscowiony tylko w jego części naelektryzowanej. Wewnątrz przewodników ładunków elektrycznych niema, o czym możemy się przekonać w następujący sposób (rys 8). Umocowaną na podstawie izolacyjnej kulę metalową wewnątrz próżną elektryzujemy elektrycznością dodatnią lub ujemną. Wprowadzając następnie przez otwór do wnętrza kuli próbną kulę na trzonku izolowanym, dotykamy nią wewnętrznej powierzchni kuli. Dotykając następnie, wyjętą kulą próbną, kulę bżową wahadła elektrycznego, przekonamy się, że ta ostatnia zachowa się obojętnie. Wskazuje to, że kulka próbna, a więc i powierzchnia wewnętrzna kuli żadnego ładunku nie posiadały.

Sposób rozmieszczenia ładunków na powierzchni zewnętrznej przewodnika zależy od kształtu tej po-



wierzchni: największe zgęszczenie ładunków jest na ostrzach, mniejsze na częściach płaskich i wklęsłych. Możemy się o tym przekonać, przenosząc kolejno ładunki zapomocą próbnej kulki z rozmaitych punktów powierzchni przewodnika na elektroskop: najmniejsze odchylenie listków elektroskopu otrzymamy po przeniesieniu ładunku z części wklęsłej przewodnika, największe — z ostrza.

Na ciele pokrytem ostrzami nie można utrzymać silnego naelektryzowania, gdyż wskutek dużej gęstości, elektryczność spływa z ostrzy i rozprasza się (t. zw. rozpraszające działanie ostrzy). Elektryzując np. elektroskop, na którego kulce jest umieszczone ostrze, zauważymy powolne opadanie listków, spowodowane właśnie spływaniem elektryczności.

Na kuli ładunek jest rozmieszczony zupełnie równomiernie, dlatego też jej kształt odpowiada najlepiej budowie zbiorników elektrycznych.

**Gęstość ładunku powierzchniowa.** Dla ilościowego zobrazowania stanu ładunku elektrycznego na powierzchni naelektryzowanego przewodnika, wprowadzamy nową wielkość zwaną **gęstością ładunku powierzchniową**. Miarą gęstości powierzchniowej ładunku jest ilość elektryczności przypadająca na 1 cm.<sup>2</sup> powierzchni przewodnika, co wyrażamy wzorem:

$$\sigma = \frac{Q}{S}$$

gdzie  $\sigma$  — gęstość ładunku powierzchniowa,  $Q$  — wielkość ładunku elektrycznego rozmieszczonego na całej powierzchni  $S$  cm.<sup>2</sup>.

Graficznie gęstość ładunku na powierzchni naelektryzowanych przewodników o różnej formie geometrycznej możemy przedstawić, jak na rys. 9, 10, 11, gdzie

linje kreskowane przedstawiają nam jakby warstwę elektryczności na przewodniku, przyczem grubszej warstwie na rysunku odpowiada w rzeczywistości większa gęstość powierzchniowa ładunku.

O ile naprzeciw ostrza przewodnika postawimy palącą się świecę, jak na rysunku 10, to zauważymy odchylenie się płomienia świecy od ostrza. Powstaje to skutkiem ruchu naelektryzowanych cząsteczek powietrza. Zjawisko to nazywamy wiatrem elektrycznym.

Jeżeli na końcu ostrza naelektryzowanego przewodnika umieścimy młynek z zagiętymi ostremi końcami (rys. 11) t. zw. młynek Franklina, to nastąpi spływanie elektryczności z zagiętych końców młynka i ten zacznie się obracać w kierunku przeciwnym spływaniu elektryczności, a to dlatego, że powietrze, elektryzując się elektrycznością tego samego znaku co i ostrza młynka, odpycha je od siebie.

**Pole elektryczne i jego natężenie.** Wyobraźmy sobie układ ładunków elektrycznych dodatnich i ujemnych, rozmieszczonych na przewodnikach otoczonych ośrodkiem jednorodnym. Ładunek elektryczny, umieszczony w pobliżu takiego układu, będzie podlegał działaniu sił według prawa Coulomba, t. zn. będzie przyciągany lub odpychany przez ładunki znajdujące się na przewodnikach. Przestrzeń, w której działają siły elektryczne nazywamy elektrycznym **polem sił**. Pole to posiada pewien kierunek, mianowicie kierunek działania sił. Zasadniczo sfera wzajemnego oddziaływania na siebie ładunków elektrycznych sięga do nieskończoności, jednak jak widać ze wzoru:

$$F = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

gdy odległość  $r$  bardzo wzrośnie, siła  $F$  może się stać tak małą, że działania jej nie dostrzeżemy.

W obszarze pola nawet w odległości skończonej od ładunku wywołującego pole istnieją miejsca, w których natężenie równe jest  $O$ . Faraday stwierdził doświadczalnie, że we wnętrzu przewodnika, nie zawierającego ciał naelektryzowanych, natężenie pola jest zawsze równe  $O$ , bez względu na to, jaką wartość ma ono nazewnątrz. Przy przesuwaniu ładunku w polu, siła nań działająca zmienia swój kierunek i wartość; linje styczne do kierunku sił w każdym punkcie pola nazywamy **linjami sił**. Posiadają one następujące własności:

- a) są krzywymi niezamkniętymi,
- b) wzajemnie się odpychają,
- c) dążą do skrócenia się.

Siły i linje sił nie charakteryzują dokładnie pola, gdyż, wprowadzając rozmaite ładunki  $q$ , otrzymamy w tym samym punkcie pola różne wartości na siłę działającą na nie, zależnie od wielkości i znaku tych ładunków, jak to widać ze wzoru:

$$F = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{Qq}{r^2}$$

Wielkościami niezależnymi od ładunku wprowadzonego i charakteryzującymi pole w każdym jego punkcie są: natężenie pola i potencjał.

**Natężenie pola** elektrycznego w danym punkcie mierzy się siłą, działającą na dodatnią absolutną elektrostyczną jednostkę ilości elektryczności umieszczoną w tym punkcie pola. Np. mamy pole elektryczne wywołane przez ładunek  $Q$ , umieścimy w tym polu (rys. 12), w punkcie  $A$ , odległym od  $Q$  o  $r$ , ładunek  $+q$  tak mały, abyśmy mogli założyć, że nie

odkształca on głównego pola; wówczas siła działająca na ładunek  $q$  będzie:

$$F = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{Qq}{r^2}$$

Według określenia natężenie pola w danym punkcie mierzy się siłą działającą na dodatnią jednostkę elektryczności, co można wyrazić wzorem:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{Q}{\epsilon r^2}$$

gdzie  $E$  oznacza natężenie pola,  $Q$  — ładunek,  $r$  — odległość punktu  $A$  od ładunku  $Q$ , który to pole wywołuje,  $\epsilon$  — stała dielektryczna ośrodka pomiędzy punktem pola  $A$  i ładunkiem  $Q$ . Natężenie pola elektrycznego posiada zawsze wielkość i kierunek, jest to więc wielkość kierunkowa. Kierunek natężenia pola elektrycznego w danym punkcie jest zgodny z kierunkiem linii sił pola; w wypadku, kiedy linie sił pola będą krzywymi, kierunek natężenia pola w jakimkolwiek punkcie będzie wskazywała styczna przeprowadzona w tym punkcie pola do linii sił przechodzącej przez ten punkt. Widzimy z wyżej podanego wzoru, że natężenie pola elektrycznego jest wprost proporcjonalne do wielkości ładunku wywołującego to pole, a odwrotnie proporcjonalne do kwadratu odległości, t. zn., że jest tem większe im większy jest ładunek  $Q$ , a tem mniejsze im większy jest kwadrat odległości. Jako absolutną elektrostatyczną jednostkę natężenia pola elektrycznego przyjmujemy natężenie takiego pola, w którym na dodatnią jednostkę elektryczności działa siła 1 dyny. Jest to więc natężenie jakie wytwarza dodatni ładunek jednostkowy (absolutna elektrostatyczna jednostka ilości elektryczności) w odległości 1 cm. Natężenie pola elektrycznego ma ten sam wymiar co siła.

**Potencjał elektryczny.** Ładunek elektryczny umieszczony na przewodniku, wskutek wzajemnego odpychania się cząstek, dąży do oderwania się z powierzchni przewodnika. Mówimy, że ładunek na powierzchni przewodnika posiada pewne napięcie. To napięcie elektryczności na przewodniku jest energią elektryczną w postaci potencjalnej.

Do mierzenia tej energii wprowadzamy nową wielkość wskazującą poziom elektryczny przewodnika (podobnie jak temperatura wskazuje na poziom stanu cieplnego). Wielkość tę nazywamy **potencjałem elektrycznym**.

Należy zwrócić uwagę, że **ładunek elektryczny sam przez się nie jest energią**, podobnie, jak nakręcona sprężyna zegara, lecz posiada energję i może wykonać pracę, o ile jest umieszczony na ciele, którego potencjał jest wyższy od potencjału przynajmniej jednego z ciał w otoczeniu. Zachodzi tu zupełna analogja z cieczą, która może wykonać pracę, gdy istnieje różnica poziomów. W dalszym ciągu będziemy często się powoływać na analogję pomiędzy cieczą i elektrycznością.

Im więcej przewodnik będzie naelektryzowany tem gwałtowniej wrywa się ładunek elektryczny z jego powierzchni i tem większe będzie napięcie tego ładunku, a tem samem większy potencjał na powierzchni przewodnika.

Tę energję czyli zdolność wykonania pracy posiada nietylko ładunek umieszczony na powierzchni ciała naelektryzowanego, lecz i poszczególne punkty pola elektrycznego wytworzonego przez ten ładunek; dlatego też musimy zawsze ściśle określić, czy mówimy o potencjale elektrycznym powierzchni ciała naelektryzowanego, czy jakiegokolwiek punktu pola elektrycznego wytworzonego przez to ciało.

Miarą potencjału elektrycznego danego punktu pola jest praca, jaką trzeba wykonać, aby absolutną elektrostacyjną jednostkę ilości elektryczności przenieść z danego punktu do nieskończoności lub do punktu, którego potencjał jest równy  $O$ . Potencjał zarówno jak praca jest wielkością bezkierunkową, nie zależy więc od drogi, po której ta absolutna elektrostacyjna jednostka ilości elektryczności zostanie przeniesiona.

Ilościowo potencjał punktu  $A$  w odległości  $r$  od ładunku  $Q$ , który to pole wytworzył (rys. 13), będzie równy pracy potrzebnej na pokonanie natężenia pola elektrycznego wzdłuż drogi od  $A$  do  $\infty$  (albo odwrotnie od  $\infty$  do  $A$ ).

Drogę od punktu  $A$  do punktu nieskończenie odległego podzielimy na odcinki punktami  $A_1, A_2, A_3$ , i t. d. Natężenie pola w tych punktach odpowiednio równa się:

$$E = \frac{Q}{\epsilon r^2}; E_1 = \frac{Q}{\epsilon r_1^2} \dots \dots \dots$$

$$\dots \dots \dots E_{n-1} = \frac{Q}{\epsilon r_{n-1}^2}; E_n = \frac{Q}{\epsilon r_n^2};$$

czyniąc odcinki  $A A_1, A_1 A_2$  i t. d. bardzo małemi, możemy przyjąć, że wzdłuż tych odcinków natężenie jest stałe i równe średniej geometrycznej natężeń punktów krańcowych odcinków, czyli natężenie na

odcinku  $A A_1 : E_1 = \frac{Q}{\epsilon r r_1}$ ; praca wzdłuż od-

cinka  $A A_1 = \frac{Q}{\epsilon r r_1} (r_1 - r) = \frac{Q}{\epsilon} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} \right)$

na odcinka  $A_1 A_2 : E_2 = \frac{Q}{\epsilon r_1 r_2}$ ; praca wzdłuż od-

$$\text{cinka } A_1 A_2 = \frac{Q}{\varepsilon r_1 r_2} (r_2 - r_1) = \frac{Q}{\varepsilon} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

na odcinku  $A_{n-1} A_n : E_n = \frac{Q}{\varepsilon r_{n-1} r_n}$ ; praca wzdłuż

$$\text{odcinka } A_{n-1} A_n = \frac{Q}{\varepsilon r_{n-1} r_n} (r_n - r_{n-1}) = \frac{Q}{\varepsilon} \left( \frac{1}{r_{n-1}} - \frac{1}{r_n} \right)$$

Całkowita praca wzdłuż drogi  $A A_n$  będzie:

$$\frac{Q}{\varepsilon} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_n} \right); \text{ gdy } r_n = \infty$$

wielkość potencjału punktu  $A$  pola będzie:

$$V = \frac{Q}{\varepsilon} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_n} \right) = \frac{Q}{\varepsilon r}$$

gdzie  $\varepsilon$  — stała dielektryczna. Wielkości  $Q$ ,  $V$ ,  $r$  muszą być wymierzone odpowiednio dobranymi jednostkami.

Jeżeli weźmiemy przewodnik w postaci kuli o promieniu  $R$  i naelektryzujemy go ładunkiem  $Q$ , to na powierzchni tej kuli wielkość potencjału elektrycznego  $V$  będzie:

$$V = \frac{Q}{R}$$

Z tego widzimy, że dla naelektryzowanego przewodnika kulistego potencjał na powierzchni tego przewodnika jest taki jakgdyby cały ładunek był umieszczony w jego środku.

Dla celów pomiarowych przyjmujemy potencjał ziemi (jako przewodnika o bardzo dużej powierzchni) oraz

potencjał wszystkich przewodników połączonych z ziemią równy 0. O ciałach posiadających potencjał wyższy od ziemi czyli naelektryzowanych elektrycznością dodatnią mówimy, że posiadają potencjał dodatni; o ciałach posiadających potencjał niższy od ziemi czyli naelektryzowanych elektrycznością ujemną mówimy, że posiadają potencjał ujemny.

Im wyższy jest potencjał na powierzchni przewodnika naelektryzowanego, tem lepiej powinien on być izolowany od ziemi. Rozpatrzmy obecnie, jaką analogję można przeprowadzić pomiędzy potencjałem elektrycznym a temperaturą.

### Tabela porównawcza.

Temperatura,	Potencjał.
1) Jedno i to samo ciało im więcej posiada energii cieplnej tem wyższa jest jego temperatura.	1) Jeden i ten sam przewodnik im większy posiada ładunek elektryczny tym większy jest jego potencjał.
2) Temperaturę topnienia lodu względnie zamarzania wody przyjmujemy za 0.	2) Potencjał ziemi i wszystkich przewodników z nią połączonych przyjmujemy za 0.
3) Ciało cieplejsze od topniejącego lodu uważamy za posiadające temperaturę dodatnią, zimniejsze — za posiadające temperaturę ujemną.	3) Ciała naelektryzowane dodatnią elektrycznością uważamy za posiadające potencjał dodatni, ciała naelektryzowane elektrycznością ujemną — za posiadające potencjał ujemny.

**Jednostki potencjału elektrycznego.** Jednostkę potencjału elektrycznego wyprowadzamy ze wzoru:

$$V = \frac{Q}{r}$$



stosując poprzednio przyjęty przez nas system. Powiadamy mianowicie, że dany punkt pola elektrycznego posiada absolutną elektrostatyczną jednostkę potencjału, o ile praca potrzebna do przeniesienia absolutnej elektrostatycznej jednostki ilości elektryczności z nieskończoności lub z punktu o potencjale równym 0 do danego punktu pola będzie równa 1 ergowi; a więc jednostką potencjału jest taki potencjał, jaki wytwarza absolutna elektrostatyczna jednostka ilości elektryczności w odległości 1 cm.

Praktyczną jednostkę potencjału określimy analogicznie jak i absolutną, używając do określenia zamiast jednostek absolutnych—praktyczne. A więc punkt pola elektrycznego będzie posiadał jednostkę potencjału praktyczną, o ile potrzebna praca do przeniesienia doń jednostki praktycznej ładunku czyli 1 kulomba z punktu o potencjale równym 0 będzie równa jednostce praktycznej pracy czyli 1 dżaulowi. Praktyczna jednostka potencjału nazwana została **woltem**. Zależność między jednostką absolutną i praktyczną potencjału wyprowadzimy w następujący sposób. Niech praca przy przeniesieniu  $Q$  jednostek elektryczności z danego punktu pola do nieskończoności równa się  $P$  ergom. Potencjał danego punktu pola będzie:

$$V = \frac{P \text{ erg}}{Q \text{ E. S. J. ładunku}} = \frac{P}{Q} \text{ E. S. J. potencjału.}$$

podstawiając: 1 erg =  $10^{-7}$  dżauli;

1 E. S. J. ładunku =  $\frac{1}{3} \times 10^{-9}$  kulomba, otrzymamy:

$$V = \frac{P}{Q} \cdot \frac{3 \cdot 10^7 \text{ dżaul}}{10^7 \text{ kulomb}} = 300 = \frac{P}{Q} \text{ woltów czyli}$$

1 E. S. J. potencjału = 300 woltów albo

$$1 \text{ wolt} = \frac{1}{300} E. S. J. \text{ potencjału}$$

Tysięczną część wolta nazywamy miliwoltem i oznaczamy literami  $m V$ .

Opisany poprzednio elektrometr może być użyty jako potencjometr, o ile stosownie przeskalujemy jego podziałkę.

Elektrometr w tym wypadku odgrywałby rolę jakby termometru elektrycznego.

**Różnice potencjałów.** W elektrotechnice często mamy do czynienia z różnicą potencjałów dwóch punktów czyli napięciem elektrycznym.

Jeżeli ciało naelektryzowane ładunkiem  $Q$  wytwarza dokoła siebie pole elektryczne, to potencjały punktów  $A$  i  $B$  tego pola, odległych od ładunku o wielkości  $r_1$  i  $r_2$  będą odpowiednio:

$$V_1 = \frac{Q}{r_1} \text{ i } V_2 = \frac{Q}{r_2}$$

różnica potencjałów tych dwóch punktów:

$$V = V_1 - V_2 = Q \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Miarą różnicy potencjałów jest praca potrzebna, aby jednostkę ilości elektryczności przenieść z jednego punktu pola do drugiego, niezależnie od drogi, po której będzie przeniesiony ten ładunek.

Mówiąc poprzednio, że ciało naelektryzowane posiada napięcie elektryczności na swej powierzchni, rozumieliśmy pod tem napięcie względem ziemi.

Rozpatrzmy obecnie jaką analogję można przeprowadzić pomiędzy różnicą potencjałów dwóch ciał naelektryzowanych, różnicą poziomów cieczy w dwóch zbiornikach i różnicą temperatur dwóch ciał.

## Tabela porównawcza.

Różnica tempera- tur.	Różnica poziomów cieczy.	Różnica potencja- łów elektr.
1) Przy zetknię- ciu dwóch ciał o różnej temperatu- rze ciepło prze- chodzi od ciała po- siadającego wyższą temperaturę do ciała posiadającego niż- szą temperaturę.	1) Przy połącze- niu zapomocą prze- kręcenia kranu dwóch zbiorników z cieczą A i B (rys. 14), o pozio- mach różnych, ciecz będzie przepływała ze zbiornika o wyższym poziomie do zbiornika o niż- szym poziomie cie- czy.	1) Przy połącze- niu ze sobą zapo- mocą przewodnika dwóch ciał naele- ktryzowanych A i B (rys. 15) o róż- nych potencjałach elektrycznych elek- tryczność będzie przepływać od ciała o wyższym poten- cjale do ciała o niż- szym potencjale.
2) Ruch ciepła od ciała o wyższej temperaturze do cia- ła o niższej tem- peraturze, zwany prądem cieplnym, będzie trwał aż do zrównania się tem- peratur tych ciał.	2) Ruch cieczy ze zbiornika o wyż- szym poziomie do zbiornika o niższym poziomie, zwany prądem cieczy, bę- dzie trwał aż do zrównania się pozio- mów cieczy w obu zbiornikach.	2) Ruch elektry- czności od ciała o wyższym potencjale do ciała o niższym potencjale, zwany prądem elektrycz- nym, będzie trwał aż do zrównania się potencjałów obu ciał.
3) Przyczyną po- wstawania prądu cieplnego jest różni- ca temperatur dwóch ciał znajdują- cych się w zetknię- ciu.	3) Przyczyną po- wstawania prądu cieczy jest różnica poziomów w połą- czonych ze sobą zbiornikach.	3) Przyczyną po- wstawania prądu elektrycznego jest różnica potencjałów dwóch ciał naelek- tryzowanych połą- czonych przewod- nikiem.

Siłę, która wywołuje ruch elektryczności, w tym wypadku, od ciała o wyższym potencjale do ciała o niższym potencjale, nazywamy siłą elektrobodźczą albo siłą elektromotoryczną.

### Z a d a n i a .

1) Kula wydrążona o promieniu 8 cm. posiada ładunek 400 *E. S. J.* Obliczyć potencjał na powierzchni kuli (rys. 16).

Potencjał na powierzchni kuli:

$$V = \frac{Q}{R} = \frac{400}{8} = 50 \text{ E. S. J. potencjału} = \\ = 15000 \text{ woltów.}$$

Podając tutaj zadania z dziedziny elektryczności, będziemy jednocześnie przytaczali takie zadania z hydrostatyki, przy rozwiązywaniu których zachodzi pewna analogja do rozwiązań zadań z elektrostatyki.

Tak więc, w odniesieniu do pierwszego zadania, podamy następujące zadanie z hydrostatyki.

Ad. 1) Obliczyć wysokość poziomu wody w naczyniu cylindrycznem o poprzecznym przekroju  $S = 8 \text{ cm.}^2$ , gdy wlejemy doń 400  $\text{cm.}^3$  wody.

$$H = \frac{V}{S} = \frac{400}{8} = 50 \text{ cm.}$$

2. Kuliste naczynie blaszane o promieniu 20 cm., zawieszane na nitkach jedwabnych, jest połączone z elektrometrem o znikomo małej pojemności. Po wrzuceniu do naczynia kawałka potartego laku elektrometr wykazał 0,5 *E. S. J.* Ile wynosił ładunek elektryczny laku? (rys. 17):

$$Q = RV = 20 \cdot 0,5 = 10 \text{ E. S. J. ładunku.}$$

Ad. 2) Do naczynia o poprzecznym przekroju  $20 \text{ cm.}^2$  połączonego ze szkłem mierniczem, została wlana pewna ilość cieczy. Jaka była ilość cieczy, jeżeli szkło miernicze wykazało poziom cieczy 0,5 cm.?

Objętość cieczy wynosi:

$$V = SH = 20 \cdot 0,5 = 10 \text{ cm.}$$

3) Miedziana kula o promieniu 30 cm. posiada  $Q = 600 \text{ E. S. J.}$  ładunku i styka się z dwoma kulami o promieniach 20 cm. i 40 cm. (rys. 18).

Określić:

- początkowy potencjał pierwszej kuli,
- potencjały kul po zetknięciu,
- ilość elektryczności na każdej kuli po zetknięciu.

Ad a) Początkowy potencjał pierwszej kuli:

$$V_1 = \frac{Q}{R_1} = \frac{600}{30} = 20 \text{ E. S. J. potencjału.}$$

Ad b) Po zetknięciu ładunek rozdziela się na trzy kule, dla obliczenia więc potencjału należy wziąć we wzorze  $V = \frac{Q}{R}$ , gdzie  $R$  równa się sumie promieni wszystkich trzech kul. Potencjał po zetknięciu na wszystkich trzech kulach będzie jednakowy i równy:

$$V = \frac{Q}{R} = \frac{600}{30 + 20 + 40} = \frac{600}{90} = \frac{20}{3} \text{ E.S.J.}$$

potencjału.

Ad c) Ilość elektryczności na każdej kuli po zetknięciu znajdziemy, mnożąc potencjał odpowiedniej kuli przez jej promień.

Ilości te będą wynosić na poszczególnych kulach:

$$Q_1 = VR_1 = \frac{20}{3} \cdot 30 = 200 \text{ E. S. J. ładunku}$$

$$Q_2 = VR_2 = \frac{20}{3} \cdot 20 = 133\frac{1}{3} \text{ " " " "}$$

$$Q_3 = VR_3 = \frac{20}{3} \cdot 40 = 266\frac{2}{3} \text{ " " " "}$$

Ad 3) Naczynie o przekroju poprzecznym  $30 \text{ cm}^2$ , zawierające  $V=600 \text{ cm}^3$  cieczy, jest połączone z dwoma naczyniami o przekrojach poprzecznych  $20 \text{ cm}^2$  i  $40 \text{ cm}^2$ . (rys. 18). Zapomocą otwarcia kranów łączymy te naczynia. Obliczyć: a) poziom cieczy w naczyniu pierwszym przed otwarciem kranu, b) poziom cieczy w naczyniach po otwarciu kranu, c) ilość cieczy w każdym naczyniu.

Ad pkt. a). Początkowy poziom cieczy w pierwszym naczyniu wynosi:

$$H_1 = \frac{V}{S} = \frac{600}{30} = 20 \text{ cm.}$$

Ad pkt. b). Po otwarciu kranów poziom cieczy we wszystkich naczyniach będzie jednakowy. We wzorze więc stosowanym poprzednio na wartość przekroju należy wziąć sumę przekrojów poszczególnych naczyń:

$$H = \frac{V}{S} = \frac{600}{30 + 20 + 40} = \frac{600}{90} = \frac{20}{3} \text{ cm.}$$

Ad pkt. c). Objętość cieczy w każdym naczyniu po otwarciu kranów znajdziemy, mnożąc przekrój poprzeczny każdego naczynia przez wysokość cieczy:

$$V_1 = H S_1 = \frac{20}{3} \cdot 30 = 200 \text{ cm}^3.$$

$$V_2 = H S_2 = \frac{20}{3} \cdot 20 = 133\frac{1}{3} \text{ cm}^3.$$

$$V_3 = H S_3 = \frac{20}{3} \cdot 40 = 266\frac{2}{3} \text{ cm}^3.$$

**Powierzchnie ekwipotencjalne.** Wyobraźmy sobie w polu elektrycznym powierzchnię normalną do linii

sił tego pola. Praca przy przesunięciu ładunku elektrycznego  $Q$  po takiej powierzchni:

$$A = Q (V_1 - V_2) = Q E l \cos \alpha$$

gdzie:  $V_1$  i  $V_2$  — potencjały końcowych punktów przesunięcia,  $E$  — natężenie pola na powierzchni rozpatrywanej,  $l$  — przesunięcie ładunku  $Q$ ,  $\alpha$  — kąt pomiędzy liniami sił i przesunięciem. Ponieważ  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\cos \alpha = 0$ , więc praca  $A = 0$ ; z wielkości, znajdujących się po lewej stronie równania:  $Q$  jest różne od 0, więc musi być  $V_1 - V_2 = 0$  czyli  $V_1 = V_2$ . Widzimy więc, że potencjały rozpatrywanej powierzchni są we wszystkich jej punktach równe. Takie powierzchnie, prostopadłe do kierunków linii sił nazywamy **ekwipotencjalnemi**. Powierzchnia każdego naelektryzowanego przewodnika jest powierzchnią ekwipotencjalną; ładunek na niej znajduje się w stanie spoczynku, gdyż niema siły, któraby go przesuwała po tej powierzchni.

**Indukcja elektryczna.** Jeżeli wprowadzimy przewodnik izolowany do pola elektrycznego, to ładunki elektryczności, znajdujące się w równowadze na powierzchni tego przewodnika, zostaną przesunięte pod wpływem sił pola. Dotykając kulką próbną tego przewodnika, a następnie elektroskopu, przekonamy się, że obojętny elektrycznie przed tem przewodnik został naelektryzowany. Ten sposób elektryzacji pod wpływem sił pola nazywamy elektryzacją przez **indukcję**. Przewodnik naelektryzowany nazywamy **indukującym**, przewodnik, na którym zostaje wzbudzona elektryczność — **indukowanym**.

Rozpatrzmy teraz, od czego zależy wielkość indukcji elektrycznej w danym punkcie pola. W tym celu umieścimy w polu elektrycznym dwie jednakowe, cienkie, małe blaszki, płasko ze sobą złożone. Okaze się, że po rozsunięciu tych blaszek każda z nich będzie

posiadać ładunek elektryczny, przyczem ładunki obu blaszek będą równe co do wielkości, różne co do znaków. Zapomocą elektrometru przekonamy się, że wielkość ładunków tych jest zależna od położenia blaszek, mianowicie: przy położeniu prostopadłym do linii sił pola ładunki będą największe, przy położeniu równoległym do kierunku linii sił pola — równe 0.

Oznaczmy wielkość ładunku indukowanego w wypadku pierwszym przez  $q$ . Otóż okazuje się, że wielkość tego ładunku jest proporcjonalna do powierzchni  $s$  jednej z blaszek; możemy to wyrazić:

$$q = Ds$$

$D$  — współczynnik proporcjonalności — nosi nazwę **indukcji elektrycznej** w danym punkcie pola. Miarą tej wielkości jest nabój indukcyjny wywołany na jednostce powierzchni.

Dalsze doświadczenia wykazują, że indukcja elektryczna zależy od natężenia pola. W próżni czyli w czystym eterze stosunek jej do natężenia pola jest wielkością stałą, równą:

$$\frac{D}{E} = \frac{1}{4\pi}; \text{ skąd } D = \frac{1}{4\pi} \cdot E$$

W ośrodkach materjalnych równość ta nie jest spełniana, prawa strona równania zmienia się, zależnie od rodzaju ośrodka. Zależność pomiędzy  $D$  i  $E$  w ośrodkach materjalnych, w przybliżeniu, da się wyrazić następującym wzorem:

$$D = \frac{\epsilon}{4\pi} \cdot E;$$

gdzie  $\epsilon$  — stała dielektryczna, wyznaczana doświadczalnie. Jak zaznaczyliśmy, wzór ten jest przybliżony.



Ośrodki, do którychby się stosował ściśle nazwalibyśmy doskonałymi dielektrykami.

Przypuśćmy teraz, że pole zostało wywołane przez ładunek  $Q$  skoncentrowany w jednym biegunie. Linje sił pola rozchodzą się będą promienisto. Natężenie tego pola będzie:

$$E = \frac{Q}{\epsilon r^2}; \text{ skąd } D = \frac{\epsilon}{4\pi} \cdot E = \frac{Q}{4\pi r^2}$$

Widzimy, że wielkość indukowanego ładunku jest wprost proporcjonalna do wielkości ładunku indukującego i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości danego punktu od ładunku. Tę zależność wyrazimy inaczej. Ponieważ ilość linii sił przypadających na jednostkę powierzchni, w wypadku pola promienistego, jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości, możemy więc powiedzieć: wielkość indukowanego ładunku jest tym większa, im większy jest ładunek indukujący i im większa ilość linii sił oprze się na powierzchni przewodnika.

W jaki sposób elektryzuje się przewodnik przez indukcję, zobrazuje nam następujący przykład. Zbliżywszy elektrycznie obojętny walec  $B$  do kuli  $A$  naelektryzowanej ładunkiem dodatnim (+). Wahadełka elektryczne, umieszczone na obu końcach i w środkowej części walca, będą zachowywać się w następujący sposób (rys. 19): na końcach walca rozchylą się, pośrodku — pozostaną w spoczynku. Dowodzi to, że walec naelektryzował się na końcach, a w środku jego pozostała przestrzeń nienaelektryzowana czyli neutralna. Gęstość ładunku na kuli i walcu pokazana jest linią kreskowaną (rys. 19 i 20). Przy pomocy elektrometru możemy się przekonać, że powstałe na obu końcach walca ładunki są równe co do wielkości i przeciwne co do znaku. Przytem, część walca  $B$

zwrócona do kuli indukującej naelektryzowała się elektrycznością przeciwnego znaku, część *C* walca — elektrycznością tego samego znaku, co i na kuli indukującej (+). Ładunki indukowane na walcu są związane ładunkiem kuli *A*, istnieją tylko przez czas przebywania walca w polu elektrycznym. Swobodnie ładunki te istniećby nie mogły, gdyż natychmiast zneutralizowałyby się. Umieścimy za tym walcem jeszcze kilka innych; na każdym z nich będziemy obserwowali to samo zjawisko elektryzowania się przez indukcję, t. j. równoczesne powstawanie na każdym z tych walców dwóch różnoimiennych ładunków elektrycznych.

O ile przed odsunięciem przewodnika indukującego połączymy część walca *C* z ziemią, jak na rys. 20, to zauważymy, że wahadełka opadną na tej części walca czyli elektryczność indukowana tego samego znaku, co na przewodniku indukującym spłynęła do ziemi, jako odpychana. Elektryczność znaku przeciwnego, mimo połączenia walca z ziemią nie spłynie, ponieważ jest związana ładunkiem indukującym kulki (wahadełka na części *B* walca pozostaną rozchylone). Przy tym stanie rzeczy usunięcie połączenia z ziemią nie spowoduje żadnych dalszych zmian w zachowaniu się wahadełek. Po usunięciu jednak kuli, wszystkie wahadełka rozchylą się, co dowodzi, że elektryczność związana stała się wolną i rozeszła się po całej powierzchni walca.

W ten sposób na walcu możemy otrzymać elektryczność jednego znaku (przeciwnego niż na przewodniku indukującym). Doświadczenie to możemy powtórzyć dowolną ilość razy i za każdym razem otrzymamy nowy ładunek, przyczem ładunek kuli nie ulega żadnym zmianom. Zdawałoby się przeto, że mamy tu stały zysk energii czyli perpetuum mobile. Tak jednakże nie jest, gdyż na wytworzenie elektryczności

indukowanej zostaje zużyta praca przy zbliżaniu przewodnika i rozdzielaniu obu rodzajów elektryczności. Mamy tu więc przekształcenie energii mechanicznej w elektryczną.

Zaopatrzymy teraz część  $B$  walca, elektrycznie obojętnego, w ostrze. Przy zbliżeniu walca do naelektryzowanej kuli rozchylą się w pierwszej chwili wahadła na obu częściach  $B$  i  $C$  walca, następnie jednak wahadła na części  $B$  powoli opadną. Po usunięciu kuli  $A$  i zdjęciu ostrza, wszystkie wahadła rozchylą się. Sprawdzając, przekonamy się, że na walcu znajduje się elektryczność tylko tego znaku, co była na przewodniku indukującym. Elektryczność znaku przeciwnego spłynęła w powietrze, zobojętniając częściowo ładunek indukujący.

**Widma linii sił powierzchni ekwipotencjalnych pól elektrycznych.** a) Dla ładunków pojedynczych (dodatniego i ujemnego) linie sił są przedstawione na rys. 21. Powierzchniami ekwipotencjalnymi w tym wypadku są powierzchnie kuliste spółśrodkowe, w środku których znajduje się jakby skoncentrowany cały ładunek, wywołujący pole elektryczne.

b) Dla dwóch ładunków różnoimiennych rozmieszczenie linii sił przedstawione jest na rys. 22a. Mechanizm tworzenia się takiego układu linii sił wyjaśnia rys. 22b. Siła, działająca w każdym punkcie tego pola jest wypadkową; jej składowymi są siły wywoływane przez poszczególne ładunki.

c) Rys. 23a i b przedstawia linie sił i powierzchnie ekwipotencjalne dwóch ładunków jednoimiennych, oraz powstawanie takiego pola.

d) Odkształcenie pola, wywołanego ładunkiem  $A$ , przez wprowadzenie doń przewodnika izolowanego  $B$  jest tego rodzaju, że w otoczeniu przewodnika nastę-

puje zgęszczenie linii sił (rys. 24a). Tłumaczy się to powstawaniem na powierzchni wprowadzonego przewodnika  $B$  ładunków indukowanych, które oddziałują na linie sił pola przewodnika  $A$  w sposób przedstawiony na rys. 24b.

e) Odkształcenie linii sił przez wprowadzenie uzziemionego przewodnika do pola elektrycznego (rys. 25) wskazuje, że uzziemiony przewodnik w polu elektrycznym jest jakby **osłoną elektryczną**. Ciało naelektryzowane, otoczone zamkniętą powierzchnią przewodnika uzziemionego, nie ujawnia żadnego działania nazewnątrz tego przewodnika.

Wprowadzenie izolatora do pola elektrycznego powoduje zgęszczenie lub rozsiewanie linii sił, zależnie od stałej dielektrycznej izolatora i ośrodka; przyczem izolator, posiadający większą stałą dielektryczną niż ośrodek, będzie linie sił rozsiewał, mniejszą — skupiał.

Naogół, przez wprowadzenie izolatora do pola elektrycznego zdeformowanie pola będzie małe.

W izolatorach idealnych ruch elektryczności odbywać się nie może.

**Piorunochron.** Celem zabezpieczenia budynków lub instalacji (sieci telefoniczne i telegraficzne) od piorunów, t. j. iskry powstającej z wyładowania elektryczności atmosferycznej, używamy piorunochronów. Piorunochron składa się z pręta stalowego, którego górny koniec jest ostro zakończony i zazwyczaj położony celem uchronienia go przed rdzewieniem. Pręt ten jest połączony zapomocą grubego drutu z płytą miedzianą lub żelazną ocynkowaną, grubości około 2—4 mm., zanurzoną w studni lub zakopaną w ziemi i, dla lepszego utrzymania wilgoci, obłożoną warstwą drobnego węgla. Drut łączący piorunochron z ziemią nie może posiadać ostrych zagięć i wraz

z prętem musi być dokładnie izolowany od przedmiotu, który ma zabezpieczać. Za zbliżeniem się chmury ładunek jej indukuje na pręcie elektryczność przeciwnego znaku, a na uziemieniu — tego samego znaku (rys. 26). Na ostrzu pręta następuje tak duże zgęszczenie elektryczności, że spływa ona w powietrze i zubożnia w znacznej mierze ładunek chmury (następuje powolne rozbrojenie ładunku chmury i pręta). Jeżeli pręt nie zdołał znacznie zubożyć ładunku chmury z powodu szybkiego jej nadejścia, to, przy odpowiednio wielkiej różnicy potencjałów, pomiędzy chmurą a prętem piorunochronu przeskakuje iskra (następuje gwałtowne zubożenie się ładunku chmury i pręta). O ile wyładowanie chmury nastąpi z inną chmurą, naładowaną elektrycznością odmiennego znaku, wówczas elektryczność związana na ostrym końcu piorunochronu staje się wolną i, jako taka, rozchodzi się po całej powierzchni i spływa w ten sposób do ziemi.

Czasem dla lepszego zabezpieczenia tworzy się na dachu osłonę elektryczną w formie sieci przewodników uziemionych (rys. 25). O ile taka osłona nie jest zrobiona, należy wówczas wszystkie części metalowe, znajdujące się w budynku, połączyć z ziemią za pomocą przewodników. (Ostatni wypadek pożaru w składach amunicji w Ameryce, wywołany przez piorun, świadczy wymownie o tem, że zabezpieczenie piorunochronowe nie odpowiadało tam swojemu zadaniu, t. j. wewnętrzne części metalowe nie były uziemione).

**Maszyny elektryczne i ich zastosowanie.** Typem maszyny elektrycznej zbudowanej na zasadzie powstawania elektryczności przez potarcie i rozsuniecie dwóch ciał różnorodnych, oraz na zasadzie indukcji elektrycznej, jest maszyna **Ramsdena** (rys. 27). Maszyna ta składa się z krążka szklanego *A*, dwóch

poduszek skórzanych *B*, pokrytych amalgamatem cynkowym i dwóch szczoteczek metalowych *D*, połączonych zapomocą przewodnika z kolektorem *C*. Działanie maszyny jest następujące: krążek szklany *A*, obracany przy pomocy korby, elektryzuje się przez tarcie o poduszki skórzane *B* dodatnio, te ostatnie — ujemnie. Ponieważ poduszki, pokryte amalgamatem cynkowym, są uziemione, więc elektryczność ujemna spływa do ziemi; dodatnia, jako swobodna, indukuje na szczoteczkach *D* elektryczność ujemną; wskutek tego na kolektorze *C*, stanowiącym jakby jeden przewodnik ze szczoteczką *D*, powstaje elektryczność dodatnia (rys. 27). Elektryczność ujemna ze szczoteczek spływa na krążek i zobojętnia elektryczność dodatnią krążka. Jeżeli połączymy poduszki skórzane *B* z innym kolektorem, to na nim będzie się gromadzić elektryczność ujemna; będziemy mieli wówczas kolektory dodatni i ujemny. Maszyny tarciove Ramsdena odznaczają się naogół bardzo małą wydajnością. Zużywają dużo energii mechanicznej, wytwarzając wzamian stosunkowo niewiele energii elektrycznej. Działanie ich jest w znacznym stopniu uzależnione od wilgotności powietrza; wilgotność wpływa na to działanie ujemnie, to też zwykle krążek szklany musi być osuszany zapomocą płomienia lampki spirytusowej lub palnika gazowego.

Bardziej doskonałemi i mniej wrażliwemi na wilgoć są t. zw. maszyny influencyjne.

Maszyna influencyjna Whimschursta różni się od maszyny Ramsdena tym, że działanie jej polega jedynie na indukcji elektrycznej.

Dwa szklane, względnie ebonitowe krążki jednakowych rozmiarów, osadzone równolegle do siebie w odległości kilku milimetrów na oddzielnych osiach, wirują w przeciwnych kierunkach. Na zewnętrznej stronie każdego krążka są naklejone stanjoloowe sektory (na rys. 28 krążek tylny jest wyrysowany nieco

większy celem odsłonięcia jego sektorów). Przed krążkami umieszczone są nieruchome łączniki:  $L_1 L'_1$  przed przednim i  $L_2 L'_2$  przed tylnym, opatrzone miotłkami z metalowego szychu, muskającymi wirujące krążki. Przypuśćmy, że sektory w górnej połowie tylnego krążka, znajdujące się między miotłkami  $L_1, L_2$ , posiadają ślady dodatniego ładunku. Przebiegając pod końcem  $L_1$  łącznika  $L_1 L'_1$ , elektryzują one indukcyjnie oba sektory przedniej płytki, które są właśnie tym łącznikiem połączone. Sektor krążka przedniego, wymykający się z pod miotłki  $L_1$ , unosi w kierunku strzałki, wskazującej obrót krążka, ładunek ujemny; dolny sektor tej płytki z pod miotłki  $L'_1$  unosi w kierunku obrotu ładunek dodatni. Ładunki te działają natychmiast na sektory tylnego krążka, znajdujące się pod łącznikiem  $L_2 L'_2$ , w sposób opisany powyżej.

Działanie to wzmacnia się znacznie skutkiem jednoczesnej indukcji od kilku sektorów. Oba krążki, wirując w przeciwnych kierunkach, unoszą na swych sektorach ładunki dodatnie ku prawej, ujemne — ku lewej stronie. Ładunki te odprowadzone zostają za pomocą grzebieni metalowych  $A_1$  i  $A_2, B_1$  i  $B_2$  do drutów biegunowych  $C$  i  $D$  zakończonych kulkami. Ostrza grzebieni działają tak, jakby ssąły elektryczność z sektorów, w rzeczywistości, zubożniają one ładunki sektorów wpływem przeciwnej elektryczności, wskutek czego na nich samych i na biegunach  $C$  i  $D$  nagromadza się elektryczność jednoimienna z ładunkami sektorów. Z pod grzebieni sektory wychodzą niemal rozbrojone, nie przerywa to jednak działania maszyny, gdyż sektory, znajdujące się między  $L_1, L_2$  oraz między  $L'_1, L'_2$ , są wciąż czynne. Bieguny  $C$  i  $D$  połączone bywają zwykle z okładkami wewnętrznymi butelek lejdejskich  $K_1$  i  $K_2$ . Ładunki dostarczane przez sektory, jakgdyby gubią się w wielkiej pojemności butelek, wskutek czego napięcie między biegu-

nami wzrasta powoli. Gdy napięcie wzrośnie do tego stopnia, że przewyższy wytrzymałość na przebicie warstwy powietrza, znajdującej się między kulami biegunowymi  $C$  i  $D$ , następuje rozbrojenie; wyładowuje się cała zawartość butelek, wytwarzając silną iskrę, poczem butelki zaczną się znowu ładować.

Wysokość napięcia, zależnie od dobroci izolatora, a więc pośrednio i od stopnia wilgotności powietrza, może dojść do 100.000 wolt.

Maszyny influencyjne są odwracalne, t. zn., że zasilane energią elektryczną zzewnątrz, obracają się same, stają się przeto motorami elektrycznymi.

**Pojemność elektryczna.** Stan elektryczny przewodnika określiliśmy zapomocą dwóch wielkości: ilości elektryczności, znajdującej się na jego powierzchni, oraz potencjału, wytworzonego na jego powierzchni przez tę ilość elektryczności.

Jeżeli naładujemy jednakową ilością elektryczności dwa przewodniki formy kulistej o średnicach różnych, to zapomocą elektrometru (używając go jako potencjometra), możemy przekonać się, że na powierzchniach tych przewodników potencjały są różne; wielkość ich jest w stosunku odwrotnym do średnicy przewodników.

Ładując kolejno jeden z tych kulistych przewodników różnemi ładunkami elektrycznymi  $Q_1$  i  $Q_2$ , przekonamy się, zapomocą tegoż elektrometru, że potencjały tego przewodnika  $V_1$  i  $V_2$  są wprost proporcjonalne do ładunków elektrycznych  $Q_1$  i  $Q_2$ . Zależność tę wyrazimy wzorem:

$$Q = C V$$

gdzie  $C$  współczynnik proporcjonalności, stały dla danego przewodnika.



Wielkość  $C$  nazywany pojemnością elektryczną przewodnika.

Zależność pomiędzy wielkością ładunku elektrycznego  $Q$ , którym został naładowany przewodnik, wielkością potencjału  $V$ , wytworzonego na jego powierzchni przez ten ładunek i wielkością pojemności elektrycznej  $C$  przewodnika możemy wyrazić zapomocą wzoru:

$$C = \frac{Q}{V}$$

wielkości  $Q$ ,  $V$  i  $C$  muszą być wymierzone odpowiednio dobranymi jednostkami.

Rozpatrzmy obecnie, jaką analogję można przeprowadzić pomiędzy pojemnością elektryczną, a wymiarami naczynia z cieczą.

### Tabela porównawcza.

#### Wymiary naczynia z cieczą.

- 1) Do zbiornika nalano  $M$  litrów cieczy; wysokość poziomu tej cieczy będzie  $H$  dcm. (rys. 29).
- 2) Do tego samego zbiornika nalano  $2M$  litrów cieczy; wysokość poziomu cieczy będzie  $2H$  dcm.
- 3) Jeżeli chcemy wlać do zbiornika  $n$  razy więcej cieczy ( $nM$ ), nie zmieniając wysokości jej poziomu, to musimy wziąć zbiornik o  $n$  razy większym poprzecznym przekroju.

#### Pojemność elektryczna.

- 1) Naelektryzowano kulę metalową ładunkiem  $Q$  jednostek ilości elektryczności. Potencjał kuli wynosi  $V$  jednostek potencjału elektrycznego (rys. 30).
- 2) Tę samą kulę naelektryzowano ładunkiem  $2Q$  jednostek ilości elektryczności. Potencjał kuli będzie wynosił  $2V$  jednostek potencjału elektrycznego.
- 3) Jeżeli chcemy umieścić na kuli  $n$  razy więcej elektryczności ( $nQ$ ), nie zmieniając potencjału na jej powierzchni, to musimy wziąć kulę o  $n$  razy większej pojemności.

- |   |  |
|---|--|
| 4) Stosunek objętości cieczy w zbiorniku o stałym przekroju do wysokości poziomu jej w tym zbiorniku równa się poprzecznemu przekrojowi tego zbiornika. | 4) Stosunek ilości elektryczności na powierzchni kuli do potencjału na jej powierzchni równa się pojemności elektrycznej tej kuli. |
| 5) Przekrój poprzeczny zbiornika.   | 5) Pojemność elektryczna kuli.   |

**Jednostki pojemności elektrycznej.** Wzór:  $C = \frac{Q}{V}$

wyraża, że pojemność jest to stosunek ilości elektryczności do potencjału przez tę ilość wytworzonego. Miarą pojemności danego ciała jest ilość elektryczności, która na danym ciele wywołuje potencjał równy jednostce. Weźmiemy przewodnik formy kulistej o promieniu  $R$ , możemy obliczyć jego pojemność ze wzoru:

$$C = \frac{Q}{V}$$

Potencjał elektryczny na powierzchni kulistego przewodnika, w zależności od posiadanego ładunku  $Q$  i promienia kuli  $R$ , wyrazi się:

$$V = \frac{Q}{R}$$

Podstawiając wyrażenie dla  $V$  do wzoru dla pojemności, otrzymamy:

$$C = \frac{Q}{\frac{Q}{R}} = R$$

czyli „pojemność elektryczna kulistego przewodnika mierzy się promieniem tego przewodnika”.

Za jednostkę absolutną elektrostatyczną pojemności elektrycznej przyjmujemy pojemność elektryczną ta-

kiego przewodnika, któremu absolutna elektrostatyczna jednostka ilości elektryczności nadaje absolutną elektrostatyczną jednostkę potencjału. Pojemność taką posiada kula o promieniu 1 cm. umieszczona w próżni.

Praktyczną jednostką pojemności elektrycznej jest **farad**. Jest to pojemność ciała, któremu ładunek równy 1 kulombowi nadaje potencjał równy 1 woltowi, czyli:

$$1 \text{ farad} = \frac{1 \text{ kulomb}}{1 \text{ wolt}} = 9 \cdot 10^{11} \text{ E. S. J.}$$

pojemności elektrycznej.

Pojemność równą 1 faradowi posiada kula o promieniu  $9 \cdot 10^{11}$  cm.  $= 9 \cdot 10^6$  klm. Ponieważ farad jest zbyt dużą jednostką, używamy w praktyce jedną milionową część farada: **mikrofarad**  $= 9 \cdot 10^5$  cm. Pojemność kuli ziemskiej wynosi 708 mikrofaradów.

**Energja naelektryzowanego ciała.** Aby układ obojętny naelektryzować, musimy wykonać pewną pracę, celem dostarczenia temu układowi ładunku elektrycznego. Według prawa zachowania energii, o ile mamy możność sprowadzenia ciała ponownie do stanu, w jakim się ono pierwotnie znajdowało, powinniśmy odzyskać włożoną pracę. Tak też jest istotnie, każde ciało naelektryzowane jest źródłem energii czyli może wykonać pewną pracę przy powrocie do stanu elektrycznie obojętnego.

Obliczymy tę pracę. Niech pewne ciało posiada potencjał  $V$ , na wywołanie którego dostarczyliśmy mu ładunek elektryczności  $Q$ . Przez połączenie danego ciała z ziemią, możemy spowodować jego zobojętnienie elektryczne. Wyobraźmy sobie, że dokonaliśmy tego nie odrazu lecz stopniowo, odprowadzając do ziemi kolejno bardzo małe ładunki  $\frac{Q}{n}$ ; przez od-

przewodzenie pierwszego ładunku uzyskaliśmy pracę:

$$A_1 = \frac{Q}{n} \cdot V, \text{ jednocześnie potencjał układu, pro-}$$

porcjonalny zawsze do ładunku zmniejszył się o  $\frac{1}{n}$  wartości poprzedniej, wynosi więc:

$$V_1 = V - \frac{V}{n}$$

Praca, uzyskana przez kolejne sprowadzanie do ziemi

następnych ładunków  $\frac{Q}{n}$ , będzie więc:

$$A_2 = \frac{Q}{n} \left( V - \frac{V}{n} \right)$$

$$A_3 = \frac{Q}{n} \left( V - \frac{2V}{n} \right)$$

.....

$$A_n = \frac{Q}{n} \left( V - \frac{(n-1)V}{n} \right)$$

Cała uzyskana praca:

$$A = A_1 + A_2 + \dots + A_n = (A_1 + A_n) + \\ + (A_2 + A_{n-1}) + \dots + \left( A_{\frac{n}{2}} + A_{\frac{n}{2}+1} \right)$$

$$A_1 + A_n = \frac{Q}{n} \left[ V + V - \frac{V(n-1)}{n} \right] = \frac{QV}{n} + \frac{QV}{n^2}$$

$$A_2 + A_{n-1} = \frac{Q}{n} \left[ V - \frac{V}{n} + V - \frac{V(n-2)}{n} \right] = \\ = \frac{QV}{n} + \frac{QV}{n^2} \text{ i t. d.}$$

Wyrazów tych będziemy mieli  $\frac{n}{2}$  czyli:

$$A = \frac{n}{2} \left( \frac{QV}{n} + \frac{QV}{n^2} \right) = \frac{QV}{2} + \frac{QV}{2n}$$

Ponieważ  $n$  możemy obrać dowolnie wielkie, więc drugi wyraz w tym równaniu będzie bardzo mały i możemy go pominąć.

Całkowita więc praca, którą uzyskamy będzie taka, jakgdyby cały ładunek  $Q$  rozbrajał się pod stałym napięciem, równym średniemu pomiędzy początkową jego wartością i końcową (w powyższym wypadku początkowa wartość  $V$ , końcowa  $0$  czyli:

$$A = \frac{1}{2} QV$$

Podstawiając  $Q = VC$ , otrzymamy:  $A = \frac{1}{2} CV^2$

**Zasada kondensatora.** Kondensatorem nazywamy przyrząd, służący do zgęszczenia ładunków elektrycznych. Zasadę działania kondensatora obrazowo ilustrują niżej podane przykłady:

1) Przewodnik  $A$ , w postaci płytki, o pojemności  $C_1$  jest naelektryzowany dodatnim ładunkiem  $Q_1$  (+), dzięki czemu posiada na swej powierzchni potencjał  $V_1$ . Na elektrometrze, połączonym z płytką  $A$ , (jako na potencjometerze) nastąpi pewne odchylenie listka, odpowiadające wielkości potencjału  $V_1$  (rys. 31).

2) Jeżeli zbliżymy do płytki  $A$  drugą płytkę  $B$ , to listek elektrometru nieco opadnie (rys. 32). Ponieważ ładunek  $Q_1$  pozostał ten sam, a potencjał się zmniejszył do wielkości  $V_2$ , wzrosła więc pojemność płytki  $A$  do wielkości, którą oznaczymy przez  $C_2$ ; nową wielkości  $C_2$  i  $V_2$  w stosunku do poprzednich

będą:  $C_2 > C_1$  i  $V_2 < V_1$ . Działanie indukcyjne dodatniego ładunku płytki  $A$  wywołało na płytce  $B$  dwa ładunki: na stronie, zwróconej ku płytce  $A$ , ładunek różnoimienny ( $-$ ), na stronie przeciwnej — jednoimienny ( $+$ ). Ładunek „ $-$ ” na płytce  $B$  dąży do związania częściowo ładunku na płytce  $A$ , skutkiem czego potencjał na powierzchni płytki  $A$  zmniejszy się. Ażeby otrzymać na jej powierzchni początkowy potencjał  $V_1$ , musimy zwiększyć ładunek do wielkości  $Q_2 > Q_1$ .

3) Połączmy płytkę  $B$  z ziemią. Kąt odchylenia listka elektrometru jeszcze się zmniejszy, co wskazuje na ponowne zmniejszenie się potencjału (rys. 33), a tem samem zwiększenie się pojemności. Oznaczając w tym wypadku nową pojemność płytki  $A$  przez  $C_3$ , potencjał na jej powierzchni przez  $V_3$ , będziemy mieli:  $C_3 > C_2$ ,  $V_3 < V_2$ . Wynika to stąd, że jednoimienna elektryczność ( $+$ ) płytki  $B$ , jako odpychana przez ładunek płytki  $A$ , spłynęła do ziemi; różnoimienna ( $-$ ), jako przyciągana, związała energiczniej ładunek na płytce  $A$ , zgęszczając go na stronie zwróconej do płytki  $B$ . Dało to możliwość zwiększenia ładunku na płytce  $A$ , bez obawy rozchodzenia się tego ładunku na przewodniki z nią połączone. Żeby otrzymać na płytce  $A$  poprzedni potencjał  $V$ , trzeba zwiększyć jej ładunek do jakiejś wielkości  $Q_3 > Q_2$ .

4) Wstawmy obecnie pomiędzy płytki  $A$  i  $B$  płytkę izolacyjną (parafina, ebonit, szkło i t. d.), jak na rys. 34. Przypuśćmy, że płytka ta jest z parafiny, listek elektrometru jeszcze więcej opadnie. Potencjał płytki  $A$  znowu się zmniejszył do wielkości  $V_4$ , a pojemność jego wzrosła do wielkości  $C_4$ . Teraz pojemność płytki  $A$  i potencjał na jej powierzchni będą w stosunku do poprzednich:  $C_4 > C_3$ ,  $V_4 < V_3$ . Ażeby mieć poprzedni potencjał  $V_1$ , musimy powiększyć ładunek płytki  $A$  do wielkości  $Q_4 > Q_3$ .

5) Ze zmianą płytki izolacyjnej z parafiny (stała dielektryczna  $\epsilon = 2$ ) na płytkę z miki (stała dielektryczna  $\epsilon = 8$ ), kąt odchylenia listka elektrometru zmniejszy się czterokrotnie. Pojemność płytki  $A$  wzrosła więc w stosunku stałej dielektrycznej.

Zjawisko zmniejszania się potencjału płytki  $A$  czyli zwiększania się jej pojemności będziemy obserwowali również:

6) przy zbliżaniu płytki  $B$  do płytki  $A$ ;

7) przy powiększeniu powierzchni płytek  $A$  i  $B$ .

Jak widzimy z wyżej podanych przykładów, układ dwóch przewodników izolowanych pomiędzy sobą służy do zwiększenia pojemności elektrycznej przewodnika połączonego ze źródłem elektryczności i daje w rezultacie zgęszczenie ładunku elektrycznego. Układ taki nazywa się **kondensatorem**. Przewodnik połączony ze źródłem elektryczności, np. z biegunem dodatnim maszyny elektrycznej i tworzący z nim powierzchnię ekwipotencjalną, zwie się **kolek'orem**. Przewodnik połączony z ziemią lub biegunem ujemnym maszyny elektrycznej zwie się **kondensorem**.

Z powyższych przykładów widzimy, że pojemność kondensatora zależy w stosunku prostym od powierzchni czynnej jednej z płytek (pkt. 7) i od stałej dielektrycznej warstwy izolującej pomiędzy płytkami (pkt. 5), oraz w stosunku odwrotnym do grubości warstwy izolującej (pkt. 6).

Na mocy powyższego możemy powiedzieć, że działanie kondensatora polega na indukcji elektrostatycznej, powodującej zwiększenie pojemności elektrycznej przewodnika przez zbliżenie do niego innego przewodnika, oraz na odpowiednim doborze izolatora.

Rozpatrzmy teraz następujący przykład.

Wyobraźmy sobie naczynie o stałym przekroju poprzecznym  $S_1$ , w którym ilość  $M_1$  cieczy osiągnie

poziom  $h_1$ . O ile weźmiemy naczynie o przekroju  $S_2 > S_1$  to, aby ciecz miała w tym naczyniu poziom  $h_1$ , będziemy musieli nalać inną ilość cieczy, jakiejś  $M_2 > M_1$ . Ilość cieczy  $M_1$  przy przekroju naczynia  $S_2$  miałaby poziom niższy,  $h_2 < h_1$ . Powiększając dalej przekrój do wielkości  $S_3$ , dla zachowania poziomu  $h_1$ , musimy zwiększyć ilość cieczy do  $M_3$ , w przeciwnym razie otrzymamy poziom cieczy niższy, jakiejś  $h_3$  (rys. 31, 32, 33, 34) i t. d.

Przy badaniu pojemności przewodnika widzieliśmy, że ze zwiększeniem pojemności elektrycznej  $C$  przy stałym naboju  $Q_1$  potencjał malał:

$$V_1 > V_2 > V_3 > V_4$$

Przy zwiększaniu przekroju  $S_1$  naczynia i przy stałej ilości  $M_1$ , poziom cieczy obniżał się:

$$h_1 > h_2 > h_3 \text{ i t. d.}$$

Przy zwiększaniu pojemności  $C$  przewodnika, celem utrzymania stałego potencjału  $V_1$ , musieliśmy dawać coraz większe ładunki:

$$Q_1 < Q_2 < Q_3 < Q_4$$

Przy zwiększaniu przekroju  $S$  naczynia, celem utrzymania stałego poziomu cieczy, musieliśmy zwiększać jej ilość w naczyniu:

$$M_1 < M_2 < M_3 \text{ i t. d.}$$

Przeprowadzając analogję pomiędzy temi zjawiskami, możemy powiedzieć, że rola, jaką odgrywa w zjawiskach elektrostatycznych pojemność, jest równoznaczna roli, jaką odgrywa przekrój poprzeczny w przytoczonym przykładzie z cieczą (patrz poprzednia tabela porównawcza).



**Kondensatory i ich pojemność.** Kondensator kulisty (rys. 35a) w praktyce rzadko się używa, gdyż posiada duże niedogodności. Składa się z dwóch kul współśrodkowych  $A$  i  $B$ , przedzielonych warstwą izolacji  $C$ . Wewnętrzna kula, która może być pełną albo pustą, odgrywa rolę kolektora, zewnętrzna — kondensatora. Poprzez kulę  $A$  i izolator  $C$  przeprowadzony jest przewodnik, służący do ładowania kondensatora.

**Kondensator płaski** (rys. 35b) składa się z dwóch płyt przewodzących  $A$  i  $B$ , tworzących okładki kondensatora i przedzielonych izolatorem  $C$ . Jedna z tych płyt odgrywa rolę kolektora, druga — kondensora.

**Pojemność kondensatora kulistego.** Udzielony kondensatorowi nabój elektryczny  $+Q$ , wywoła na stronie wewnętrznej osłony  $A$  równy mu, lecz o znaku przeciwnym nabój  $-Q$ , na zewnętrznej stronie osłony  $A$  nabój  $+Q$ , który odprowadzimy przez połączenie zewnętrznej osłony z ziemią. Na powierzchni więc zewnętrznej kondensatora potencjał będzie równy  $0$ .

Praca, potrzebna na dostarczenie z nieskończoności jednostki ładunku do kuli  $B$ , sprowadza się więc do pracy potrzebnej do przeniesienia jednostki ładunku z zewnętrznej powierzchni kuli  $A$  do kuli  $B$ . Pole elektryczne pomiędzy okładkami będzie z powodu symetrii promieniste, a jego natężenie w dowolnej odległości  $R'$  od środka kul wszędzie jednakowe i równe:

$$E = \frac{Q}{\epsilon R'^2}$$

Jeżeli przyjmiemy, że promienie kul: zewnętrznej  $R_1$  i wewnętrznej  $R_2$  różnią się między sobą bardzo mało czyli, że ścianka kuli  $A$  i warstwa izolatora są

dostatecznie cienkie, to możemy przyjąć, że natężenie pola pomiędzy okładkami jest stałe i równe:

$$E = \frac{Q}{\varepsilon R^2} \quad \text{gdzie } R = \sqrt{R_1 R_2}$$

Praca więc wzdłuż drogi  $R_1 - R_2$  będzie równa

$$A = E (R_1 - R_2) = \frac{Q}{\varepsilon R^2} (R_1 - R_2)$$

Praca ta jest miarą potencjału kuli  $B$ . Oznaczając grubość dielektryka przez  $d = R_1 - R_2$ , mamy:

$$V = \frac{Q d}{\varepsilon R^2}$$

gdzie  $V$  — potencjał kuli  $B$  kondensatora; stąd:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{\frac{Q d}{\varepsilon R^2}} = \frac{\varepsilon R^2}{d} = \frac{4 \pi R^2 \varepsilon}{4 \pi d} = \frac{\varepsilon S}{4 \pi d}$$

gdzie  $S$  — powierzchnia kuli,  $C$  — pojemność kondensatora.

Wzór ten stosuje się również, gdy warstwa izolatora nie jest bardzo cienka. Wystarczy wyobrazić sobie wówczas, że całą warstwę dielektryka dzielimy szeregiem niewiele od siebie oddalonych powierzchni kulistych współśrodkowych z kulami  $A$  i  $B$  na pewną liczbę warstw bardzo cienkich. Nie zmieni to wcale ustroju pola, a kondensator pierwotny rozpadnie się na mnóstwo kondensatorów o warstwie izolatora bardzo cienkiej.

Oczywiście, jeżeli elektryczność rozmieścimy tylko na części  $s$  powierzchni  $S$ , to pojemność tej części kondensatora  $c$  wyrazi się wzorem:

$$c = \frac{\varepsilon s}{4 \pi d}$$

**Pojemność kondensatora płaskiego.** Pole elektryczne w tym kondensatorze tworzy się wyłącznie niemal w szczelinie między płytkami, przyczem linie sił będą proste i prostopadłe do płytek. Tylko niewielka ilość linii sił przy brzegach kondensatora tworzy linie krzywe, pod wpływem pól wytworzonych przez ciała znajdujące się w otoczeniu.

Z dużym przybliżeniem można powiedzieć, że ładunki na obu płytkach znajdują się na ich wewnętrznych powierzchniach. Kondensator płaski można uważać więc za część kondensatora kulistego o promieniu nieskończenie wielkim i dla pojemności jego zastosować poprzednio wprowadzony wzór:

$$C = \frac{\epsilon S}{4 \pi d}$$

Pojemność kondensatora płaskiego jest zatem proporcjonalna do jego powierzchni czynnej i odwrotnie proporcjonalna do grubości warstwy izolującej.

Po naładowaniu kondensatora otrzymujemy pomiędzy okładkami pewną różnicę potencjałów czyli energję elektryczną w postaci potencjalnej.

O ile obie okładki kondensatora połączyć przewodem, to energja potencjalna zawarta w kondensatorze przekształci się w energję kinetyczną, nastąpi ruch elektryczności od kolektora do kondensora, a ponieważ ładunki rozmieszczone na tych częściach są równe ilościowo, a przeciwne co do znaku, więc nastąpi zoobojętnienie ich; mówimy wówczas, że kondensator jest wyładowany czyli rozbrojony.

Przy różnicy potencjałów między okładkami, przekraczającej wytrzymałość na przebicie dielektryka, wyładowanie kondensatora nastąpi przez dielektryk w postaci iskry; dielektryk twardy zostaje wówczas mechanicznie uszkodzony.

Jeżeli będziemy mieli kondensator z warstwą izolującą, odpowiadającą warstwie powietrznej o grubości 1 mm., to przy różnicy potencjałów między okładkami około 4800 woltów, nastąpi wyładowanie kondensatora przez dielektryk, przyczem ten ostatni zostanie uszkodzony. Przy ponownem ładowaniu takiego kondensatora różnica potencjałów pomiędzy okładkami musi być mniejsza, nie może przekraczać wielkości, odpowiadającej wytrzymałości na przebicie warstwy powietrza o grubości uszkodzonego dielektryka.

**Stała dielektryczna.** Jeżeli w kondensatorze zamienimy jego izolator na powietrze ( $\epsilon \cong 1$ ), pojemność kondensatora zmniejszy się i będzie:

$$C = \frac{S}{4\pi d}$$

Możemy określić stałą dielektryczną danego izolatora, jako stosunek pojemności kondensatora  $C_d$ , gdy między okładkami mamy ten izolator, do pojemności tego samego kondensatora  $C_p$ , gdy izolator zostanie zastąpiony tej samej grubości warstwą powietrza:

$$\epsilon = \left( \frac{C_d}{C_p} \right)$$

### Z a d a n i a.

1) Dwie płaskie blachy z miedzi, każda o powierzchni  $S = 100 \text{ cm.}^2$  posiadają ładunek  $Q = 500 \text{ E. S. J.}$  Te blachy są okładkami płaskiego kondensatora, którego dielektrykiem jest powietrze. Odległość między okładkami  $d = 0,5 \text{ mm.}$  Obliczyć w woltach różnicę potencjałów na okładkach.

Pojemność płaskiego kondensatora:

$$C = \frac{\epsilon S}{4 \pi d} = \frac{1.100}{4 \pi \cdot 0,05} = 160 \text{ cm.}$$

różnicę potencjałów otrzymamy, dzieląc ładunek okładki przez pojemność:

$$V = \frac{Q}{C} = \frac{500}{160} = 3,14 \text{ E. S. J.} = 942 \text{ wolty.}$$

2) Z arkuszy stanjolu o powierzchni  $S = 30 \text{ cm.} \times 40 \text{ cm.}$  zrobiony jest kondensator, którego dielektrykiem jest papier nasycony parafiną. Grubość dielektryka  $d = 0,1 \text{ mm.}$  Stała dielektryczna  $\epsilon = 2.$  Określić pojemność tego kondensatora w mikrofaradach.

Pojemność kondensatora:

$$C = \frac{\epsilon S}{4 \pi d} = \frac{2.1200}{4 \pi \cdot 0,01} = 19000 \text{ E. S. J.}$$

Obliczamy pojemność kondensatora w mikrofaradach:

$$C = \frac{19000}{9 \cdot 10^5} = 0,21 \text{ mikrofarada.}$$

**Energja naładowanego kondensatora.** Przy wyładowaniu kondensatora przez połączenie dwóch jego okładek przewodem lub przez przebicie dielektryka, będziemy mieli do czynienia z przekształceniem energii elektrycznej w postaci potencjalnej w energję elektryczną w postaci kinetycznej.

Podstawiając do wzoru dla energii ciała naelektryzowanego wartość na pojemność kondensatora płaskiego, otrzymamy:

$$A = \frac{C V^2}{2} = \frac{\epsilon S}{8 \pi d} \cdot V^2$$

lub też w zależności od naboju i pojemności:

$$A = \frac{C V^2}{2} = \frac{Q V}{2} = \frac{Q^2}{2 C}$$

gdzie  $A$  — praca w dżaulach,  $C$  — pojemność w faradach,  $V$  — różnica potencjałów pomiędzy okładkami w woltach.

### Tabela porównawcza.

Dwa naczynia o różnych poziomach cieczy.

- 1) Dwa zbiorniki o tym samym poprzecznym przekroju  $S$ , rozdzielone kranem  $R$ ; różnica poziomów cieczy w zbiornikach —  $h$  (rys. 36).
- 2) Masa cieczy zawarta w części naczynia  $A$ , ponad poziomem jej w naczyniu  $B$ :  $M = S \cdot h$  (ciężar właściwy cieczy = 1).
- 3) Jeżeli przekręcimy kran  $R$  i połączymy zbiorniki, ciecz popłynie ze zbiornika  $A$  do zbiornika  $B$ , aż do zrównania w nich poziomów, przyczem poziom w zbiorniku  $B$  będzie wyższy niż poprzednio o  $\frac{h}{2}$ , w zbiorniku  $A$  niższy od poprzedniego o  $\frac{h}{2}$ .

Praca wykonana przy tem:

$$A = M \cdot \frac{h}{2}$$

Kondensator naładowany.

- 1) Dwie okładki naładowanego kondensatora o pojemności elektrycznej  $C$ , różnica potencjałów  $V$  pomiędzy okładkami (rys. 37).
- 2) Ładunek elektryczny kondensatora:  $Q = CV$ .
- 3) Jeżeli rozładujemy kondensator przez przewodnik, to elektryczność popłynie z okładki o większym potencjale do okładki o mniejszym potencjale, aż do wyrównania się potencjałów obu okładek, tak że różnica potencjałów między okładkami będzie równa 0. Praca wykonana przy tem wyniesie:

$$A = Q \cdot \frac{V}{2} = \frac{C V^2}{2}$$

### Z a d a n i e.

Obliczyć grubość dielektryka kondensatora płaskiego, którego powierzchnia okładki  $S = 8 \text{ dcm.} \times 20 \text{ dcm.}$ , stała dielektryczna jego dielektryka  $\epsilon = 5$ , jeżeli przy różnicy potencjałów na swych okładkach  $V = 981 \text{ wolt}$ , przy rozbrojeniu wykonywa taką pracę, jak 1 litr wody spadającej z wysokości 0,1 m.

Woda, spadając, wykona pracę:

$$A = 1 \cdot 0,1 = 0,1 \text{ kgm} = 0,1 \cdot 9,81 \text{ dżauli}$$

Praca, uzyskana przez rozbrojenie kondensatora:

$$A = \frac{CV^2}{2}; C = \frac{2A}{V^2} = \frac{2 \cdot 0,1 \cdot 9,81}{981^2}$$

$$= 0,0000002 \text{ farada} = 0,0000002 \cdot 9 \cdot 10^{11} \text{ cm.}$$

$$\text{z drugiej strony } C = \frac{\epsilon S}{4 \pi d}, \text{ skąd:}$$

$$d = \frac{\epsilon S}{4 \pi C} = \frac{5 \cdot 16000}{4 \pi \cdot 0,0000002 \cdot 9 \cdot 10^{11}} = 0,04 \text{ cm.}$$

**Butelka lejdejska** jest to szklany cylinder, oklejony z zewnątrz i wewnątrz okładkami ze stanjolu nie sięgającymi jego brzegu. Brzeg ten, celem polepszenia izolujących właściwości szkła, powleczony bywa szellakiem. (Rys. 38). Okładka wewnętrzna połączona jest zapomocą przewodzących podpór z prętem metalowym zakończonym kulką i przechodzącym przez środek cylindra. Ładujemy butelkę lejdejską, dotykając kulką do źródła energii elektrycznej, np. kolektora maszyny elektrycznej i trzymając jednocześnie ręką zewnętrzną

okładkę butelki. W ten sposób przez naszą rękę elektryczność indukowana jednoimienna spłynie do ziemi. Okładka wewnętrzna butelki lejdejskiej będzie kolektorem kondensatora, zewnętrzna — kondensorem.

Rozładować butelkę lejdejską można przez połączenie przewodnikiem okładki zewnętrznej z kulką pręta, a tem samym z okładką wewnętrzną butelki.

Butelki lejdejskie posiadają w porównaniu do kondensatora płaskiego bardzo dużą wytrzymałość na przebicie. Pojemność ich oblicza się zapomocą tego samego wzoru co i pojemność kondensatora płaskiego. Butelki lejdejskie większych rozmiarów, o pojemności od 10000 cm. do 15000 cm. mają zastosowanie na dużych stacjach radjotelegraficznych. Butelki te zostały udoskonalone przez prof. I. Mościckiego i noszą nazwę kondensatorów prof. Mościckiego.

**Łączenie kondensatorów w baterję.** Jak widzimy

ze wzoru:  $A = \frac{1}{8} \cdot \frac{\epsilon S}{\pi d} \cdot V_2$ , energia elektryczna

w postaci potencjalnej, zawarta w płaskim kondensatorze, może być zwiększona przez:

1) zamianę dielektryka kondensatora na inny, o większej stałej dielektrycznej ( $\epsilon$ ),

2) zwiększenie powierzchni okładek ( $S$ ) — przez co zwiększamy wymiary kondensatora,

3) zwiększenie różnicy potencjałów pomiędzy okładkami ( $V$ ), co może spowodować przekroczenie granicy wytrzymałości na przebicie dla danej grubości dielektryka,

4) zmniejszenie grubości dielektryka ( $d$ ) — co również wpłynie na zmniejszenie wytrzymałości na prze-



bicie, a więc będzie wymagać zmniejszenia różnicy potencjałów pomiędzy okładkami danego kondensatora.

Ze względów praktycznych kondensatory o dużych rozmiarach są niedogodne. Celem osiągnięcia dużej pojemności stosowane są grupy czyli baterje kondensatorów połączonych pomiędzy sobą w ten lub inny sposób, zależnie od celu, do którego baterja kondensatorów ma służyć.

a) **Połączenie równoległe kondensatorów** polega na tem, że łączymy wszystkie kolektory z dodatnim biegunem źródła elektryczności, np. z kolektorem maszyny elektrycznej, wszystkie kondensory — z ziemią lub z ujemnym biegunem tej maszyny (rys. 39).

Wszystkie kondensory, oraz wszystkie kolektory tworzą dwie powierzchnie ekwipotencjalne. Oznaczmy potencjał tych powierzchni odpowiednio  $V_1$  i  $V_2$ . Różnica potencjałów pomiędzy okładkami poszczególnych kondensatorów i na zaciskach baterji będzie jednakowa:  $V = V_1 - V_2$ . Całkowity ładunek  $Q$ , otrzymany z dodatniego bieguna maszyny, rozdzieli się pomiędzy poszczególne kondensatory odpowiednio do ich pojemności. Ładunek baterji:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots$$

gdzie  $Q_1, Q_2, Q_3$ , są to ładunki poszczególnych kondensatorów.

W ten sposób otrzymamy jakby jeden kondensator wypadkowy o powierzchni równej sumie powierzchni kondensatorów składowych. Pojemność poszczególnych kondensatorów będzie:

$$C_1 = \frac{Q_1}{V_1 - V_2}; C_2 = \frac{Q_2}{V_1 - V_2} \dots \text{i t. d.}$$

Dodając powyższe równania, otrzymamy:

$$C_1 + C_2 + C_3 + \dots = (Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots) \cdot \frac{1}{V_1 - V_2} = \frac{Q}{V_1 - V_2}$$

oznaczając wypadkową pojemność baterji kondensatorów przez  $C$ , możemy napisać:

$$C = \frac{Q}{V_1 - V_2} = \frac{Q}{V} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

Wypadkowa pojemność danego układu kondensatorów równa się sumie pojemności poszczególnych kondensatorów. Ten sposób łączenia kondensatorów używamy, gdy z jakiegoś źródła otrzymujemy duże ilości elektryczności, a chcemy uniknąć przy jej gromadzeniu zbyt wielkiej różnicy potencjałów, np. ładowanie baterji kondensatorów od ogniwa lub akumulatora.

**b) Połączenie szeregowe kondensatorów** polega na tem, że łączymy kolektor jednego z nich z biegunem dodatnim źródła elektryczności, a następnie kolektor każdego kondensatora z kondensorem poprzedniego, dbając o to, by wszystkie z wyjątkiem ostatniego, który łączymy bądź z biegunem ujemnym źródła elektryczności, bądź z ziemią, były od ziemi izolowane (rys. 40). Przy tem sposobie łączenia kondensatorów, ładunki na wszystkich okładkach będą równe co do wielkości, a różne co do znaków, albowiem ładunek  $+Q$ , otrzymany przez pierwszy kolektor, wywoła przez indukcję na kondensorze swego kondensatora związany ładunek  $-Q$  i odpychany ładunek  $+Q$ , który przejdzie na kolektor następnego kondensatora i będzie dalej indukował dwa nowe ładunki  $-Q$  i  $+Q$  na kondensorze sąsiedniego kondensatora i t. d.

Ściśle biorąc, źródło elektryczności dostarcza tylko ładunek  $+Q$  na kolektor pierwszego kondensatora, reszta ładunków powstaje przez indukcję. Jeżeli oznaczymy różnicę potencjałów na okładkach każdego z poszczególnych kondensatorów przez  $V'$ ,  $V''$ ,  $V'''$ , to dla pierwszego kondensatora będziemy mieli:

$$V' = V_0 - V_1 = \frac{Q}{C_1};$$

dla drugiego kondensatora:

$$V'' = V_1 - V_2 = \frac{Q}{C_2};$$

dla n-ego kondensatora:

$$V^n = V_{n-1} - V_n = \frac{Q}{C_n} \text{ i t. d.}$$

Różnica potencjałów baterji będzie:

$$\begin{aligned} V &= V_0 - V_1 + V_1 - V_2 + \dots + V_{n-1} - V_n = \\ &= V_0 - V_n = Q \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \right) \end{aligned}$$

czyli różnica potencjałów baterji szeregowo połączonych kondensatorów będzie równa różnicy potencjałów jednego kondensatora, którego okładkami będą kolektor pierwszego i kondensator ostatniego kondensatora, a grubość dielektryka równa sumie grubości poszczególnych dielektryków.

Ponieważ ładunek całej baterji wynosi:

$$Q = C (V_1 - V_n) = CV,$$

to wypadkową pojemność  $C$  możemy określić z powyższych równań w następujący sposób:

$$V = \frac{Q}{C} = Q \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \right)$$

$$\text{stad: } \frac{1}{C} = \frac{V}{Q} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

z tego wynika, że odwrotna wartość wypadkowej pojemności baterji szeregowo połączonych kondensatorów równa się sumie odwrotnych wartości pojemności poszczególnych kondensatorów.

Widzimy więc, że przy szeregowem połączeniu kondensatorów w baterję będziemy mieli wzrost wytrzymałości na przebicie i zmniejszenie pojemności w porównaniu do pojedynczego kondensatora.

Szeregowę połączenie kondensatorów używamy, gdy źródło elektryczności dostarcza małej ilości elektryczności przy dużej różnicy potencjałów, którą to różnicę chcemy zachować, np. przy ładowaniu kondensatorów zapomocą maszyny elektrycznej. Przy szeregowem połączeniu kondensatorów, na każdy poszczególny kondensator wypada tylko część całkowitej różnicy potencjałów baterji i tym mniejsza im większa będzie pojemność danego kondensatora, czyli różnica potencjałów na poszczególnych kondensatorach będzie odwrotnie proporcjonalna do ich pojemności. Wskutek tego kondensator o najmniejszej pojemności powinien posiadać największą wytrzymałość na przebicie.

Dla baterji z  $n$  kondensatorów o jednakowej pojemności  $C$ , różnica potencjałów na każdym kondensatorze będzie  $n$  razy mniejsza niż na zaciskach baterji,

$$\text{t. j. } V' = \frac{V}{n}. \text{ Pojemność baterji } C = \frac{C_1}{n}, \text{ a ładunek}$$

baterji będzie ten sam, co na każdym kondensatorze.

c) **Połączenie mieszane.** Jeżeli będziemy mieli  $n$  kondensatorów jednakowej pojemności  $C_1$  połączonych szeregowo w grupy, a takich grup połączonych rów-

nolegle będzie  $m$  (rys. 41), to pojemność takiej baterji:  $C = \frac{m}{n} \cdot C_1$ ; różnica potencjałów baterji będzie:  $V = n V_1$ , a ładunek  $Q = m Q_1$ .

O ile liczba grup połączonych równolegle będzie ta sama co liczba kondensatorów połączonych szeregowo w grupie, to pojemność baterji  $C$  równać się będzie pojemności jednego kondensatora.

Połączenie mieszane kondensatorów stosujemy, kiedy chodzi o jednoczesne uzyskanie korzyści wynikających z połączenia szeregowego i równoległego, a więc o rozłożenie napięcia na kondensatory połączone w grupach szeregowo, oraz o zwiększenie ilości elektryczności przez połączenie grup równolegle.

### Z a d a n i e.

16 kondensatorów, każdy o pojemności 0,2 mikrofarada, połączono mieszanie w baterję po 4 kondensatory w grupie. Od maszyny elektrycznej do baterji przepłynęło 0,0008 kulomba elektryczności. Jaka różnica potencjałów będzie na zaciskach baterji kondensatorów i jaka jest jej pojemność?

Każdy kondensator będzie naładowany ilością elektryczności tyle razy mniejszą, ile kondensatorów połączono równolegle:

$$Q_1 = \frac{Q}{m} = \frac{0,0008}{4} = 0,0002 \text{ kulomba}$$

różnica potencjałów na okładkach każdego kondensatora:

$$V_1 = \frac{Q_1}{C_1} = \frac{0,0002}{0,2 \cdot 10^{-4}} = 1000 \text{ woltów,}$$

różnica potencjałów na zaciskach baterji:

$$V = n V_1 = 4.1000 = 4000 \text{ woltów,}$$

pojemność baterji kondensatorów:

$$C = \frac{m}{n} \cdot C_1 = \frac{4 \cdot 0,2}{4} = 0,2 \text{ mikrofarada.}$$

Widzimy, że w rezultacie pojemność baterji kondensatorów jest taka sama jak jednego kondensatora, użykaliśmy natomiast 4 razy większą wytrzymałość na przebicie baterji w porównaniu do pojedynczego kondensatora, a tem samem możność udzielenia baterji ładunku cztery razy większego niż jednemu kondensatorowi.

**Kondensator o zmiennej pojemności.** Budowa kondensatora obrotowego pozwala nam zmieniać pojemność jego w pewnych granicach. Kondensator obrotowy składa się z szeregu metalowych półkrażków umocowanych sztywno na osi pionowej *A*, mogącej się obracać. Przez obrót osi *A* wprowadzamy przymocowane do niej półkrażki pomiędzy drugi szereg takich samych półkrażków, umocowanych nieruchomo zapomocą podpórek dobrze izolowanych od ruchomych półkrażków i od osi (rys. 42). Kondensator ten jest faktycznie baterją kondensatorów połączonych równolegle: półkrażki są okładkami kondensatorów, dielektrykami — warstwy powietrza lub oliwy, znajdujące się między niemi. Półkrażki ruchome, wsunięte więcej lub mniej pomiędzy półkrażki stałe, zwiększają lub zmniejszają wypadkową pojemność kondensatora. Największą pojemność kondensator będzie posiadał, gdy półkrażki ruchome wejdą całkowicie pomiędzy półkrażki nieruchome (położenie przedstawione na rys. linjami przerywanemi) w przeciwnym wypadku (na rys.

linje ciągłe) — najmniejszą pojemność. Pojemność tych kondensatorów zmienia się w granicach od 30 cm do 2400 cm. Takie kondensatory używamy na stacjach radjotelegraficznych odbiorczych.

**Płaski kondensator papierowy i mikowy.** Papierowy kondensator jest właściwie baterią kondensatorów połączonych równolegle (rys. 43). Okładki są ze stanolu (linje ciągłe), dielektrykiem jest papier nasycony oliwą lub parafiną (linje kreskowane). Na rys. 43 pokazane są jakby 4 kondensatory papierowe połączone równolegle, mające wspólny zacisk *A* dla kolektorów i zacisk *B* dla kondensatorów.

W rzeczywistości jest tutaj kondensatorów liczbowo tylko o jeden mniej niż ilość płytek, gdyż każda płytka następująca po pierwszej odgrywa dwie role. Jest ona kondensorem jednego oraz kolektorem następnego kondensatora. Jeżeli zrobimy więc kondensator z 8-miu płytek, to otrzymamy wskutek połączenia równoległego 7 kondensatorów, a nie 4, jak można byłoby przypuszczać. Pojemność kondensatora, składającego się z *n* okładek i zbudowanego jak na rys. 43, obliczamy według następującego wzoru:

$$C = \frac{\varepsilon S}{4 \pi d} \cdot (n - 1)$$

Kondensatory papierowe nawet o małych wymiarach mogą posiadać pojemność od 10000 cm. do 25000 cm. Czasami jako dielektryka, zamiast papieru nasyconego oliwą lub parafiną, używa się miki. Kondensatory mikowe, o odpowiednio tych samych wymiarach co papierowe, posiadają większą pojemność, niż te ostatnie ze względu na większą stałą dielektryczną miki.

**Przekształcanie energii elektrycznej w energię mechaniczną i ciepłą.** Jako przykład przekształcania energii elektrycznej w postaci potencjalnej w energię mechaniczną może służyć dzwonek elektrostatyczny, w energię ciepłą — rozbicie kondensatora przez przewodnik i przez dielektryk.

a) **Dzwonek elektrostatyczny** składa się z dwóch metalowych szalek *A* i *B*, pomiędzy którymi jest zawieszona na nitce izolacyjnej lekka kulka metalowa *C* (rys. 44). Szalka *A* jest izolowana od ziemi i połączona np. z dodatnim kolektorem maszyny elektrycznej, szalka *B* — z ujemnym kolektorem tej maszyny lub z ziemią. Kulka *C*, znajdując się w polu elektrycznym dodatniego ładunku szalki *A* i tej samej wielkości ujemnego ładunku szalki *B*, dzięki indukcji elektrostatycznej naelektryzuje się ujemnie od strony szalki *A*, dodatnio od strony szalki *B*. To samo zjawisko będziemy mieli niezależnie od tego, czy szalka *B* będzie połączona z ujemnym kolektorem maszyny elektrycznej czy z ziemią, tylko w pierwszym wypadku wielkość ładunków indukowanych na kulce *C* będzie większa, niż w drugim. O ile szalka *B* jest połączona z ujemnym biegunem maszyny elektrycznej, siły działające na kulkę w polu elektrycznym są w równowadze i kulka sama nie wychyli się z pierwotnego położenia. Jeżeli jednak popchniemy kulkę *C* w stronę szalki *A*, to przy zetknięciu się jej z szalką nastąpi zobojętnienie ujemnego ładunku kulki *C* przez równy mu co do wielkości ładunek dodatni szalki *A*, poczem kulka naelektryzuje się dodatnio. Teraz kulka, naelektryzowana jednoimiennie z szalką *A*, będzie przez tę ostatnią odpychana, a przyciągana przez szalkę *B*, jako naelektryzowana różnoimiennie. Wskutek zetknięcia z szalką *B* zajdzie zjawisko analogiczne do poprzedniego t. j. zobojętnienie ładunku dodatniego kulki,



naelektryzowanie jej ładunkiem ujemnym i odepchnięcie w stronę szalki *A*.

Jak widzimy ładunki szalek *A* i *B* będą mały po każdym zetknięciu się ich z kulką *C*. Chcąc mieć stały ruch kulki pomiędzy szalkami, trzeba nieustannie uzupełniać ich ładunki.

W wypadku połączenia szalki *B* z ziemią, kulka *C* będzie pobierała ładunek od szalk *A* i przy zetknięciu z szalką *B* oddawała go do ziemi.

W powyższym przykładzie energia elektryczna w postaci potencjalnej na szalkach dzwonka przekształca się w energję mechaniczną w postaci kinetycznej ruchu kulki pomiędzy obiema szalkami i uderzaniu o nie. Taki ruch ładunków elektrycznych zapomocą kulki *C* nazywamy prądem **przenoszonym lub konwekcyjnym**.

**b) Rozbrojenie kondensatora przez przewodnik.**  
Okładki naładowanego kondensatora łączymy zapomocą przewodnika częściowo wtopionego w bańkę szklaną zakończoną rurką w kształcie litery *U* (rys. 45). Jeżeli ciśnienie w bańce jest równe atmosferycznemu, to ciecz w rurce w obu kolanach ustawi się na jednym poziomie. Z chwilą połączenia okładek kondensatora zapomocą przewodnika, elektryczność z dodatniej okładki kondensatora dąży do połączenia się z elektrycznością okładki ujemnej, otrzymujemy więc ruch ładunku dodatniego w kierunku ładunku ujemnego; zauważymy, że poziom cieczy w lewej części rurki obniży się, w prawej — podniesie. Tłumaczy się to przejściem energii elektrycznej naładowanego kondensatora w energję cieplną, powodującą rozgrzanie się drucika w kuli i podniesienie przez to temperatury jego otoczenia, a co zatem idzie zwiększenie ciśnienia. Ilość wydzielonego ciepła wytworzonego przez wyładowanie kondensatora:  $Q = 0,24 A \text{ kal.}$ , gdzie *A*

jest energia elektryczna potencjalna kondensatora obliczona w dżaulach. Przyrząd ten jest termometrem wynalezionym przez niemieckiego fizyka Riess'a.

Ruch ładunków elektrycznych po przewodniku od potencjału wyższego do potencjału niższego nazywamy **prądem przewodzonego**.

Zjawisko prądu przewodzonego spotykaliśmy już przy rozpatrywaniu różnicy potencjałów dwóch przewodników. Czas trwania prądu przewodzonego jest niedostrzegalny.

### Z a d a n i e.

Powierzchnia każdej okładki butelki lejdejskiej równa się 15 dcm.<sup>2</sup>, grubość dielektryka  $d = 1$  mm., stała dielektryczna  $\epsilon = 4$ . Butelka jest naładowana do różnicy potencjałów 9000 volt. Obliczyć, ile ciepła wydzieli się przy rozbrojeniu naładowanej butelki.

Energia naładowanego kondensatora:

$$A = \frac{1}{8} \cdot \frac{\epsilon S}{\pi d} \cdot V^2 = \frac{1 \cdot 4 \cdot 1500}{8 \cdot 3,14 \cdot 0,1} \cdot 30^2 \text{ ergów} = 2149681 \text{ erg.}$$

Dla obliczenia ilości ciepła wydzielonego przy rozbrojeniu butelki zamieniamy ergi na dżauły, a następnie, mnożąc tę ilość przez 0,24, otrzymamy ilość ciepła w kalorjach gramowych. Ilość wydzielonego ciepła wynosi:

$$Q \text{ kal. gr.} = 0,24 A \text{ dżauły} = 0,24 \cdot 0,2149681 = 0,0516 \text{ kal. gr.}$$

c) **Rozbrojenie kondensatora przez dielektryk.** Gdy różnica potencjałów na okładkach naładowanego

kondensatora przewyższy granicę jego wytrzymałości na przebicie, wówczas wyładowanie kondensatora może nastąpić przez dielektryk. Kondensator taki zostaje uszkodzony i pojemność jego naogół zmniejsza się. Takie połączenie przez dielektryk ładunku dodatniego z ładunkiem ujemnym czyli ruch ładunków elektrycznych przez dielektryk nazywamy **prądem przesunięcia**.

Prąd przesunięcia możemy obserwować w postaci iskry, przy zbliżaniu do siebie kul biegunowych maszyny Whimschursta. O ile odległość pomiędzy kulkami jest 1 mm. to dla powstania prądu przesunięcia potrzebna jest różnica potencjałów około 4800 wolt. Te dwie wielkości, t. j. odległość pomiędzy kulkami biegunowymi i różnica potencjałów pomiędzy nimi, nie są wielkościami proporcjonalnymi: długość iskry powstającej między przewodnikami wzrasta prędzej, aniżeli odpowiadająca jej różnica potencjałów.

**Układ elektrostatyczny jednostek wielkości elektrycznych i ich wymiary.** Układ elektrostatyczny jednostek jest pochodnym układu bezwzględnego *C. G. S.* w zastosowaniu do elektrostatyki; w zastosowaniu do elektrodynamiki i magnetyzmu używany jest układ jednostek zwany układem elektromagnetycznym.

Prawie wszystkie jednostki wielkości elektrostatycznych mogą być wyrażone w każdym z tych układów, przytem istnieje pomiędzy ich jednostkami następująca zależność:

Aby otrzymać daną jednostkę w układzie elektromagnetycznym, trzeba odpowiednią jednostkę w układzie elektrostatycznym pomnożyć przez współczynnik zawierający liczbę  $3 \cdot 10^{10}$  do pewnej potęgi ( $3 \cdot 10^{10}$  jest to szybkość światła wyrażona w cm. na sekundę).

Niżej podana tabela ilustruje wymiary wielkości elektrycznych, ich jednostki absolutne i praktyczne, a także zależność pomiędzy wielkościami elektrycznymi i wielkościami fizycznymi.

Wielkości elektryczne	Zależność wielkości elektr. pomiędzy sobą i od wielkości fizycznych	Jednostki absolutne w układzie C. G. S. elektrostatyczn.	Jednostki praktyczne i ich zależność od jedn. absolutnych w układzie C. G. S. elektrostat.	Wymiar wielkości elektr. w układzie C. G. S. elektrostatycznym
Ilość elektryczności (ładunek elektrycz.)	$Q = r \sqrt{\epsilon F}$ $\left[ F = \frac{Q^2}{\epsilon r^2} \right]$	$\frac{\text{gr.}^{1/2} \text{cm}^{3/2}}{\text{sek}}$	kulomb = $= 3 \cdot 10^9 \text{ JES}$	$L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}$
Natężenie pola elektrycznego w danym punkcie . . .	$E = \frac{F}{Q} = \frac{Q}{\epsilon r^2}$	$\frac{\text{gr}^{1/2}}{\text{cm}^{1/2} \text{sek}}$	—	$L^{-1/2} M^{1/2} T^{-1}$
Potencjał elektryczny . . .	$V = \frac{Q}{\epsilon r}$	$\frac{\text{gr.}^{1/2} \text{cm}^{1/2}}{\text{sek}}$	wolt = $= \frac{1}{300} \text{ JES}$	$L^{3/2} M^{1/2} T^{-1}$
Pojemność elektryczna . . .	$C = \frac{Q}{V}$	cm	mikrofarad = $= 9 \cdot 10^5 \text{ JES}$ cm	$L^1$

### III. ELEKTRODYNAMIKA.

#### Teorja prądu.

**Prąd elektryczny i jego własności.** Zjawisko prądu elektrycznego, które określiliśmy przy rozpatrywaniu różnicy potencjałów jako ruch ładunków elektrycznych, stanowi drugi dział elektrotechniki, zwany **elektrodynamiką**. W zależności od charakteru tego ruchu rozróżniamy prądy: przenoszone czyli konwekcyjne, przewodzone i przesuwane. Ruch elektryczności przewodzonej, a takim będziemy się głównie zajmowali, odbywa się przez cały przekrój przewodnika. Elektryczność dynamiczna, w przeciwstawieniu do statycznej, znajduje się więc nie tak, jak ta ostatnia, jedynie na powierzchni przewodnika, lecz w całym jego przekroju.

Prąd elektryczny, jak widzieliśmy, możemy otrzymać przez połączenie zapomocą przewodnika dwóch ciał naelektryzowanych do różnych potencjałów. Prąd ten jednak jest krótkotrwały.

Przypomnimy tutaj przykład z dwoma naczyniami połączonemi o różnych poziomach cieczy i dwoma ciałami o różnych potencjałach. Widzieliśmy, że ciecz przepływać będzie z jednego naczynia do drugiego, aż do wyrównania poziomów, a elektryczność—z jednego ciała do drugiego, aż do wyrównania potencjałów.

Wyobraźmy sobie, że w miarę napływu cieczy do naczynia o niższym poziomie, przepompowujemy ją do naczynia, z którego wypływa; otrzymamy wówczas, kosztem pracy zużytej na pompowanie, stały prąd cieczy. Otóż, w wypadku ciał naelektryzowanych, jeżeli zapomocą jakichkolwiek środków (źródłem których mogą być bądź to reakcje chemiczne, bądź energia cieplna lub mechaniczna) uzyskamy powrotny ruch elektryczności, to otrzymamy w ten sposób, w wypadkach szczególnych, stałą (wogóle zmienną) różnicę potencjałów i prąd trwały pomiędzy danymi ciałami. Przyczynę, powodującą ten powrotny ruch elektryczności, nazywamy siłą **elektromotoryczną** lub **elektrobodźczą**. Źródło jej będzie tem samym źródłem prądu. Zrozumiałem jest, że im większa będzie siła elektromotoryczna źródła, tem więcej elektryczności będzie przepływać przez obwód w danym okresie czasu.

Ponieważ w całym tym procesie nie zachodzi powstawanie elektryczności, a jedynie jej ruch, więc biorąc pod uwagę prawo zachowania elektryczności, analogiczne do prawa zachowania masy, widzimy, że koniecznym jest, żeby droga prądu t. j. przewodniki, po których prąd przepływa tworzyły łańcuch zamknięty. Taki łańcuch nazywamy **obwodem elektrycznym**. Podzielmy cały obwód na dwie części (rys. 46-a). Część  $BZA$ , w której znajduje się źródło prądu, nazywamy obwodem wewnętrznym, część  $AOB$  — obwodem zewnętrznym. Miejsca złączeń tych obwodów nazywamy końcówkami źródła prądu lub biegunami, przyczem biegun o wyższym potencjale zwiemy dodatnim, o niższym — ujemnym. Różnicę potencjałów pomiędzy biegunami nazywamy napięciem na końcówkach źródła.

Rozpatrzmy obecnie jakie własności posiada prąd elektryczny, przepływający, dajmy na to, pomiędzy

ciałami *A* i *B*. Stosując odpowiednie przyrządy, zauważymy następujące zjawiska (rys. 46-b):

- a) Iгла magnetyczna, zbliżona do przewodnika łączącego ciała *A* i *B*, odchyli się od płaszczyzny południka magnetycznego. Dowodzi to, że prąd elektryczny wywołuje pole magnetyczne.
- b) Termometr wskaże wzrost temperatury w kalorymetrze po zanurzeniu do niego przewodnika (części przewodnika *AB*). Kosztem pracy prądu otrzymujemy więc energię cieplną.
- c) W naczyniu z kwasem siarczanym, do którego zanurzone są dwie płytki połączone z końcami przeciętego w tym miejscu przewodnika *AB*, zobaczymy na płytce połączonej z ciałem *B* wydzielające się pęcherzyki wodoru. Kosztem pracy prądu zachodzą przemiany chemiczne.
- d) Żarówka elektryczna, włączona do przeciętego w tym miejscu przewodnika *AB*, świeci — przemiana energii elektrycznej w energię świetlną.
- e) Człowiek, dotykający ręką przewodnika *AB*, dozna wstrząśnienia nerwowego — wpływ fizjologiczny.

W elektrotechnice spotykamy się z dwoma rodzajami prądów:

1. **prądy silne**, mające zastosowanie w przemyśle,
2. **prądy słabe**, stosowane w telefonach, telegrafach, radjotelegrafach i t. p. Każdy z tych rodzajów możemy jeszcze podzielić na:
  - a) prąd stały,
  - b) zmienny i
  - c) tętniący, złożony ze stałego i zmiennego.

W książce tej rozpatrzymy obszerniej prądy silne, t. zn. o napięciu kilkudziesięciu lub kilkuset wolt,

stosowane do oświetlenia, poruszania maszyn i t. d., ograniczając się tylko do niezbędnych wiadomości z dziedziny prądów słabych.

### Prąd stały.

**Natężenie prądu.** Mierząc ilościowo i jakościowo zjawiska, zachodzące pod wpływem prądu elektrycznego, stwierdzimy, że rezultaty pomiarów będą zależne od własności elektromotorycznych źródeł prądu. Zauważymy mianowicie, że im więcej elektryczności będzie przepływać w określonym przeciągu czasu przez każdy z opisanych powyżej przyrządów, tym większe będą cyfry wyrażające pomiary. Tę cechę prądu, przejawiającą się w zależności ilości elektryczności od czasu, w którym ona przepływa przez obwód, nazywamy **natężeniem** prądu. Jako wniosek z prawa zachowania elektryczności wynika, że natężenie prądu w obwodzie zamkniętym i nierozgałęzionym jest wszędzie jednakowe, przez każdy bowiem przekrój przewodnika w tym samym czasie przepływa ta sama ilość elektryczności. Miarą natężenia prądu jest ilość elektryczności, przepływająca przez przekrój przewodnika w jednostkę czasu. Oznaczając natężenie prądu przez  $J$ , możemy napisać:

$$J = \frac{Q}{t}$$

Jednostką bezwzględną w układzie *J.E.S.* będzie natężenie takiego prądu, przy którym przez przekrój poprzeczny przewodnika przepływa 1 *J.E.S.* elektryczności na sekundę.

Praktyczna jednostka natężenia prądu została nazwana **amperem**; jest to takie natężenie, przy którym w przeciągu jednej sekundy przez poprzeczny przekrój przewodnika przepływa 1 kulomb elektryczności:



1 Amper = 1 kulomb / sekundę =  $3 \cdot 10^9$  J.E.S.

Tysiącną część ampera nazywamy **miliamperem** i oznaczamy literami *mA*.

Z powyższego związku wyprowadzamy jednostkę ilości elektryczności stosowaną w praktyce **amperogodzinę**; jest to taka ilość elektryczności, która przepływie w ciągu 1 godziny przez przekrój przewodnika przy natężeniu prądu 1 amper.

Jeżeli po przewodniku o przekroju *S* płynie prąd o natężeniu *J*, to powiadamy, że gęstość prądu w przewodniku wynosi:

$$j = \frac{J}{S},$$

Ze wzoru tego, zakładając pewną gęstość prądu, możemy obliczyć przekrój przewodnika, dla danego natężenia lub też dopuszczalną wielkość natężenia prądu dla danego przekroju przewodnika:

$$S = \frac{J}{j}; \quad J = jS$$

### **Prawo Ohma i oporność przewodników.** (rys. 47).

Przy stanie równowagi elektrycznej, we wszystkich częściach dowolnego, jednolitego przewodnika, potencjał ma wartość stałą. Inaczej jest w przewodniku pod prądem, gdyż właśnie zjawisko prądu zachodzi jedynie wtedy, gdy istnieje różnica potencjałów. Przy przepływie prądu, z warunku ruchu ładunków elektrycznych ku niższemu potencjałowi wynika, że na całej długości obwodu pomiędzy biegunami dodatnim i ujemnym, wartości potencjałów muszą się zmniejszać w sposób ciągły w kierunku prądu. Różnica potencjałów pomiędzy dwoma dowolnymi punktami przewodnika jest miarą spadku potencjału na danym odcinku obwodu.

Ohm stwierdził doświadczalnie, że spadek ten jest proporcjonalny do natężenia prądu:

$$V_1 - V_2 = R J$$

gdzie  $R$  — współczynnik proporcjonalności,  $V_1$  i  $V_2$  — potencjały dwóch dowolnych punktów przewodnika pod prądem,  $J$  — natężenie tego prądu. Współczynnik  $R$  nazywamy **opornością omową** danego przewodnika. Za jednostkę bezwzględną oporności przyjęto oporność takiego przewodnika, w którym 1 *E.S.* różnicy potencjałów wzbudza prąd o 1 *E.S.* natężenia. Praktyczną jednostką oporności jest 1 **om** ( $\Omega$ ); jest to oporność przewodnika, w którym różnica potencjałów równa 1 woltowi wzbudza prąd o natężeniu 1 ampera:

$$1 \text{ om} = \frac{1 \text{ wolt}}{1 \text{ amper}} = \frac{1}{300.3 \cdot 10^9} = \frac{1}{9} 10^{-11} \text{ J. E. S.}$$

Miljon omów nazywamy **megaomem** i oznaczamy  $M\Omega$ . Jedną milionową część oma nazywamy **mikroomem** i oznaczamy  $\mu\Omega$ .

Dalsze doświadczenia wykazały zależność pomiędzy opornością przewodnika, i jego wymiarami. Zależność ta ustalona przez Ohma jest następująca: oporność przewodnika jest wprost proporcjonalna do jego długości, a odwrotnie proporcjonalna do przekroju:

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

$\rho$  — współczynnik proporcjonalności, zależny od rodzaju przewodnika, nazywamy **opornością właściwą**. Gdy oporność mierzymy w omach, długość w cm. i przekrój w  $\text{cm}^2$ , wtedy oporność właściwa danego przewodnika jest opornością cylindra o długości 1 cm. i przekroju 1  $\text{cm}^2$ . W technice, celem wyznaczenia opor-

ności właściwej przewodnika, mierzymy oporność drutu danego rodzaju o długości 1 m. i przekroju 1 mm.<sup>2</sup>.

Odwrotnością oporności jest **przewodność**:

$$G = \frac{1}{R} = \gamma \frac{S}{l}; \text{ stąd } R = \frac{l}{\gamma S},$$

gdzie  $\gamma$  — przewodność właściwa.

Oporności właściwe niektórych ciał używanych w elektrotechnice liczone na 1 mm.<sup>2</sup> przekroju i 1 m. dł. przy temp. 15°C.

	$\rho$
Srebro . . . . .	0,0159
Miedź . . . . .	0,0175
Aluminiujum . . . . .	0,0287
Żelazo . . . . .	0,1300
Stal . . . . .	0,1800

Specjalne metale opornikowe:

Manganin (składa się z miedzi, manganu i niklu, używany w termometrach elektrycznych):

$$\rho = 0,41 — 0,46$$

Nikielina (składa się z miedzi i niklu, używa się do grzejników, pieców elektr. i t. d.)

$$\rho = 0,33 — 0,5$$

Woda destylowana posiada oporność właściwą b. dużą, stosowana więc być może jako izolator.

Roztwory wodne, stosowane w praktyce jako oporniki, posiadają oporność właściwą kilku do kilkudziesięciu omów, przyczem jako oporność właściwą płynów należy rozumieć oporność słupka płynu o przekroju 1 cm.<sup>2</sup> i dł. 1 cm.

Oporność właściwa przewodnika zależna jest od temperatury i naogół wraz z temperaturą wzrasta,

Istnieją przytem ciała, t. zw. nadprzewodniki, jak np. rtęć i ołów, dla których w bardzo niskich temperaturach oporność równa się zeru. Zjawisko to dotąd jest niewytłumaczone. Zależność oporności od temperatury wyraża się wzorem:

$$R_t := R_{15} (1 + \alpha t)$$

gdzie  $R_t$  — oporność szukana,  $R_{15}$  — oporność przy  $15^\circ\text{C}$  i  $\alpha$  — współczynnik, który dla czystych metali w praktyce używanych wynosi  $\alpha \cong 0,004$ , dla nikielu  $\alpha = 0,0002$ , dla manganinu  $\alpha \cong 0$ .

Przewodniki, używane w technice do przewodzenia prądu, winny posiadać jaknajmniejszą oporność, aby strata energii na pokonanie jej była nieduża.

Aby uniemożliwić rozpraszanie elektryczności przez zetknięcie przewodnika z innymi ciałami przewodzącymi, należy go otoczyć, względnie umieścić na izolatorze.

**Przewodniki pierwszej i drugiej klasy.** Ze względu na zmiany, zachodzące przy przewodzeniu prądu elektrycznego w niektórych przewodnikach, ogół ich został podzielony na dwie klasy. Do klasy pierwszej zaliczone zostały takie przewodniki, w których zmiany natury chemicznej nie dają się zauważyć, a więc metale i węgiel; do klasy drugiej takie, które pod wpływem przewodzonego prądu podlegają przemianom chemicznym.

Do drugiej klasy zaliczamy roztwory soli, kwasów i zasad. Noszą one nazwę elektrolitów.

**Przewodzenie elektryczności w metalach i elektrolitach.** Jak już wspomnieliśmy przy rozpatrywaniu zjawiska elektryzowania ciał przez potarcie, według teorii elektronów w każdym ciele znajduje się pewna

ilość elektryczności dodatniej, związanej z jądrami i równoważna jej ilość ujemnej — związana z elektronami. Ponieważ, przy przewodzeniu prądu przez metale, nie spostrzegamy żadnego ruchu materji, więc należy przypuszczać, że ruch elektryczności powstaje w nich za pośrednictwem elektronów. Zaznaczyliśmy już, że przewodnictwo danego przewodnika zależy od jego temperatury, ponieważ jednak nie ma podstaw do przypuszczania, że ogólna ilość elektronów danego ciała zmienia się ze zmianą temperatury, więc zmianę przewodnictwa należy przypisać jedynie zmianie ilości elektronów biorących udział w przewodzeniu, a więc takich elektronów, które pod działaniem siły elektromotorycznej przesuwają się w kierunku przeciwnym temu, który uważamy za kierunek ruchu ładunków dodatnich. Są to jakby elektrony swobodne.

W każdym przewodniku istnieją takie elektrony w większej lub mniejszej ilości; o przewodnikach takich powiadamy, że są one zjonizowane. W zależności od stopnia zjonizowania możemy wyobrazić sobie pewną gęstość i zależną od niej prężność tego zbioru elektronów swobodnych.

Inaczej przedstawia się sposób przewodzenia elektryczności w elektrolitach. Doświadczenie stwierdzone zostało, że przepływ prądu połączony jest z przepływem materji. Jako wyjaśnienie tego zjawiska przyjmujemy, że w elektrolitach elektrony swobodne nie istnieją, istnieją jedynie atomy lub grupy atomów różne chemicznie, wiążące elektrony mniej lub więcej silnie, np. wodór łatwo pozbywa się swych elektronów, a tlen poza swoimi łączy elektrony swobodne. Na skutek tego jedne z tych grup wzgl. dnie atomów są naelektryzowane dodatnio, inne ujemnie. Pod działaniem siły elektromotorycznej grupy te lub atomy, zwane jonami, a posiadające ładunki dodatnie, przesuwać się w kierunku prądu, posiadające ładunki

ujemne, w kierunku przeciwnym. Prąd więc elektryczny w elektrolitach jest k nwekcyjny.

**Prąd elektryczny w gazach.** Czyste i suche gazy nie posiadają w swym składzie swobodnych jonów, umożliwiających przenoszenie się prądu elektrycznego czyli są dielektrykami. Jednakże wyższa temperatura, stan rozrzedzenia gazu, wysokie napięcie elektryczne i inne czynniki mogą spowodować rozerwanie się gazów na jony czyli ich jonizację, przez co stają się one przewodnikami.

O ile na elektrodach *a*, *b*, wtopionych na końcach rurki szklanej mniej więcej kształtu jak na rys. 48, będziemy mieli różnicę potencjałów do kilku tysięcy wolt, to w rurce tej napełnionej rozrzedzonym gazem np. neonem, helem i t. d. już pod ciśnieniem 7 mm. słupka rtęci zauważymy świecenie się gazu czyli t.zw. jarzenie. Wskazuje to, że gaz został zjonizowany i w tym stanie jest przewodnikiem. Wielkość napięcia pomiędzy elektrodami rurki, potrzebna do wywołania jarzenia, zależy od rodzaju i prężności gazu, przytem im bardziej gaz jest rozrzedzony, tem napięcie pomiędzy elektrodami może być mniejsze. W miarę rozrzedzania gazu będą się zmieniać zewnętrzne objawy jarzenia. Przy obniżeniu ciśnienia w rurce do kilkunaśtu tysięcznych milimetra słupka rtęci, jarzenie znika, natomiast od katody wychodzą promienie, zwane katodowymi, które, padając na ścianki rurki, powodują ich świecenie się.

Dalsze rozrzedzenie gazu powoduje wzrost jego oporu, a temsamem wzrost napięcia potrzebnego do przewodzenia prądu w gazie, gdyż wewnątrz rurki zbliża się do próżni, która jest najdoskonalszym dielektrykiem.

Zjawisko powstawania promieni katodowych, powodujących świecenie się szklanych ścianek rurki przy

jednoczesnem zanikaniu jarzenia, było badane dokładnie przez Thompsona, który stwierdził, że promienie katodowe znacznie różnią się od promieni świetlnych. Posiadają one następujące własności:

- a) wychodzą z katody zawsze w kierunku prostopadłym do jej powierzchni,
- b) spotykając na swej drodze szkło, nie przenikają go, natomiast przenikają przez wszystkie metale. Szklane ścianki rurki, pod wpływem padających na nie promieni katodowych, wyłaniają z siebie odmienne od katodowych promienie  $X$ , albo Röntgena, przenikające przez szkło i wszystkie ciała nieprzezroczyste,
- c) napotykając wewnątrz rurki szkło, kredę i niektóre metale, powodują ich świecenie czyli fluorescencję,
- d) ulegają odchyleniu pod wpływem linii sił pola elektrycznego, przytem w takim kierunku, jak-gdyby same promienie katodowe tworzyły strumień ujemny jonów,
- e) ulegają odchyleniu pod wpływem linii sił pola magnetycznego,
- f) ozchodzą się w najdoskonalszej próżni, jaką przy pomocy istniejących pomp można uzyskać.

Na podstawie badań nad promieniami katodowemi, Thompson wygłosił teorię, w której stwierdza, że „promienie katodowe polegają na szybkim, prostoliniowym ruchu niezmiernej ilości jednakowych ciałek, zbliżonych do najdrobniejszych cząstek materji, obdarzonych masą i bezwładnością i naładowanych elektrycznością ujemną”. Właśnie te ciała nazywamy elektronami.

Każde ciało (stałe, płynne i gazowe) w stanie rozżarzonem posiada zdolność wydzielania z siebie swo-

bodnych elektronów, które wylatują z niego we wszystkich kierunkach.

Zwłaszcza dużą zdolność do wydzielania elektronów posiadają w stanie rozżarzone tlenki baru, wapnia i strontu. Wylatujące z pewną szybkością elektrony, rozbijają po drodze cząstki otaczającego gazu, powodując jego jonizację. Szybkość ruchu elektronów zależy tylko od napięcia istniejącego pomiędzy elektrodami rurki, nie zależy od rodzaju gazu i materiału elektrod.

Zdolnością jonizacji tłumaczy się fakt przebicia izolatora przez prąd, pomimo, że materiały używane w technice do izolacji posiadają dużą oporność, wynoszącą od  $10^6$  do  $10^{12}$   $\Omega$  na  $\text{cm}^2$  przekroju i  $\text{cm}$ . dł., przytem przy wyborze izolatora stosuje się duży współczynnik bezpieczeństwa (3—5).

Rozpatrzmy np. w jaki sposób zostaje przebity izolator z ciała stałego. Każde ciało stałe jest porowate i pory te wypełnione są gazami; niewielka ilość wilgoci zmniejsza opór gazu i zaczyna się słaby przepływ prądu; ponieważ jednak opór gazu jest naogół duży, więc na pokonanie go zużywa się większa część energii prądu przepływającego, wskutek czego następuje wzrost temperatury w danym miejscu. Przy wyższej temperaturze gaz się jonizuje, a zjonizowany łatwiej przewodzi prąd. Jednocześnie przy wzroście natężenia prądu, temperatura również wzrasta, wskutek czego gaz rozszerza się nadmiernie i rozrywa izolator.

Ciecze, stosowane jako izolatory, ulegają przebiciu wskutek zawartości jakichś soli (elektrolit). Musimy dobrać takie izolatory, które mają wytrzymałość wysoką i trwałą t. j. niezależną od temperatury. Wytrzymałość izolatora na przebicie mierzy się najmniejszym napięciem przypadającym na 1  $\text{cm}$ . grub. izolatora, przy którym zostaje on przebity.



Jeżeli więc napięcie wynosi  $V$  woltów, a grubość izolatora  $d$  cm., to miarą wytrzymałości na przebicie jest iloraz  $\frac{V}{d}$ .

**Wytrzymałość na przebicie niektórych ciał.** Powietrze atmosferyczne w normalnych warunkach posiada wytrzymałość na przebicie równą  $26 \frac{KV}{\text{cm}}$  (kilowolt = 1000 wolt).

Oleje transformatorowe i porcelana 90 — 100  $\frac{KV}{\text{cm}}$

Mikanit . . . . . 160  $\frac{KV}{\text{cm}}$

Parafina czysta i papier kablowy 180 — 300  $\frac{KV}{\text{cm}}$

Twarda guma, szkło, czysta mika 500—1000  $\frac{KV}{\text{cm}}$

Uogólniając prawo Ohma na cały obwód elektryczny, w którym przyczyną prądu jest siła elektromotoryczna, powiadamy: siła elektromotoryczna równa jest iloczynowi z natężenia przez oporność całego obwodu:

$$E = RJ$$

gdzie  $R$  — oporność całego obwodu, a więc suma oporności obwodu zewnętrznego i wewnętrznego:

$$R = R_z + R_w$$

Rugując  $J$  ze wzorów:

$$V_1 - V_2 = JR_z; E = J(R_z + R_w)$$

gdzie  $V_1$  i  $V_2$  — potencjały na zaciskach źródła prądu otrzymamy:

$$E = V_1 - V_2 \left( 1 + \frac{R_w}{R_s} \right).$$

Gdy obwód nie jest zamknięty czyli  $R_s$  bardzo duże, to

$$E = V_1 - V_2.$$

Miarą więc siły elektromotorycznej jest napięcie na końcówkach źródła.

Jako analogja spadku napięcia w obwodzie elektrycznym może służyć spadek ciśnienia w rurze łączącej zbiorniki  $A$  i  $B$  (rys. 49). Jeżeli kran  $D$  jest zamknięty, poziom wody w rurkach  $C, E, F$  sięga tej samej wysokości co w naczyniu  $A$ . Skoro jednak kran  $D$  otworzymy, wówczas w rurze łączącej naczynia  $A$  i  $B$  powstanie prąd wody, a poziomy w rurkach  $C, E, F$  opadną i to tem silniej, im bardziej otworzymy kran, to znaczy, im silniejszy prąd będzie płynął pomiędzy naczyniami  $A$  i  $B$ . Spadek ciśnienia nie będzie we wszystkich rurkach jednakowy; będzie on coraz większy w kierunku prądu wody.

Odcinki  $aa_1, bb_1, cc_1$ , będą graficznie wskazywać wielkości spadku ciśnienia wody przy danym prądzie na odcinkach rury od zbiornika  $A$  do odpowiednich rurek.

**Rozgałęzienie prądu w obwodzie.** O ile prąd, przepływając po obwodzie, napotyka na swej drodze rozgałęzienia, to idzie on po wszystkich tych rozgałęzieniach, przyczem zależność pomiędzy natężeniem prądu w rozgałęzieniach, całkowitem natężeniem prądu i opornością poszczególnych przewodników rozgałęzionych dają nam prawa Kirchoffa.

**Pierwsze prawo Kirchoffa** głosi, że natężenie prądu przed rozgałęzieniem równe jest natężeniu prądu poza rozgałęzieniem, oraz równe jest sumie natężeń prądów w rozgałęzieniach. Jeżeli do punktu  $A$  (rys. 50) dopływa prąd o natężeniu  $J_A$ , z punktu  $B$  odpływa prąd o natężeniu  $J_B$ , a w rozgałęzieniach mamy odpowiednio natężenia prądu  $J_1, J_2, J_3$ , to:

$$J_A = J_1 + J_2 + J_3 = J_B.$$

**Drugie prawo Kirchoffa** daje nam zależność pomiędzy natężeniem prądu w poszczególnych rozgałęzieniach i ich opornościami, mianowicie głosi ono, że natężenia prądów rozgałęziających się z tych samych punktów obwodu, są odwrotnie proporcjonalne do oporności rozgałęzionych przewodników. Jeżeli mamy w punktach  $A$  i  $B$  obwodu rozgałęzienia (rys. 51), to istniejący pomiędzy temi punktami spadek napięcia, będzie spadkiem dla każdego z poszczególnych rozgałęzień. Oznaczając oporności przewodników przez  $r_1, r_2, r_3$ , natężenia prądu odpowiednio przez  $i_1, i_2, i_3$ , będziemy mogli napisać:

$$V_A - V_B = r_1 i_1 = r_2 i_2 = r_3 i_3$$

skąd  $\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_2}{r_1}; \frac{i_1}{i_3} = \frac{r_3}{r_1}; \frac{i_2}{i_3} = \frac{r_3}{r_2}$

**Połączenie szeregowe oporów.** Niech poszczególne części obwodu (rys. 52a) mają oporności  $AB = r_1, BC = r_2, CD = r_3$ . Na mocy prawa Ohma dla części obwodu  $AD$  możemy napisać:

$$J = \frac{V_A - V_D}{R}; \quad V_A - V_D = JR$$

gdzie  $R$  oporność części obwodu  $AD$  czyli całkowita oporność połączonych między sobą szeregowo przewodników.

Poszczególne dla każdej części obwodu możemy wyrazić spadek napięcia w zależności od jej oporności i natężenia prądu:

$$V_A - V_B = J_1 r_1; V_B - V_C = J_2 r_2; V_C - V_D = J_3 r_3.$$

Mając na względzie, że w obwodzie nierozgałęzionym natężenie prądu  $J$  jest wielkością stałą czyli:

$$J_1 = J_2 = J_3 = J, \text{ otrzymamy:}$$

$$V_A - V_D = RJ = (V_A - V_B) + (V_B - V_C) + (V_C - V_D) = J (r_1 + r_2 + r_3)$$

$$\text{skąd } R = r_1 + r_2 + r_3$$

czyli wypadkowa oporność przewodników połączonych szeregowo równa jest sumie oporności poszczególnych przewodników.

Połączenie szeregowe przewodników w obwodzie zewnętrznym źródła energii elektrycznej możemy porównać do połączenia zbiorników wody o różnych poziomach zapomocą rur o różnych przekrojach (rys. 52b). Pompa  $E$ , podtrzymująca stałą różnicę poziomów wody w zbiornikach, odgrywa analogiczną rolę jak źródło prądu w obwodzie elektrycznym.

**Połączenie równoległe oporności omowych.** Jeżeli w obwodzie zamkniętym pomiędzy punktami  $A$  i  $B$  umieścimy równoległe kilka przewodników (rys. 53), to na mocy pierwszego prawa Kirchoffa i prawa Ohma możemy napisać:

$$J = i_1 + i_2 + i_3 = \frac{V_A - V_B}{R} = (V_A - V_B) \frac{1}{R}$$

gdzie  $R$  — oporność wypadkowa rozgałęzionych przewodników.

Dalej, na mocy tegoż prawa Ohma, dla każdego z tych przewodników mamy:

$$i_1 = \frac{V_A - V_B}{r_1}; \quad i_2 = \frac{V_A - V_B}{r_2}; \quad i_3 = \frac{V_A - V_B}{r_3}$$

Ponieważ różnica potencjałów na końcach *A* i *B* każdego z rozgałęzionych przewodników jest jednako-  
kowa, więc sumując te równania otrzymamy:

$$i_1 + i_2 + i_3 = (V_A - V_B) \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} \right)$$

porównując to ostatnie z pierwszym równaniem znajdziemy, że:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}$$

Widzimy więc, że przy połączeniu równoległym przewodników, odwrotność oporności wypadkowej jest równa sumie odwrotności oporności poszczególnych przewodników. Porównując równoległe połączenie przewodników z takimże rozgałęzieniem rurociągu, widzimy, że w obu wypadkach przez włączenie równoległe odpowiednio przewodnika lub rury zwiększamy jakby przekrój przewodu pomiędzy miejscami złączeń, przez co zmniejszamy pomiędzy nimi oporność wypadkową (rys. 54).

Wypadkowa oporność przewodników połączonych równoległe będzie mniejsza od najmniejszej z oporności składowych.

**Praca prądu.** W przewodniku pod prądem odbywa się stały ruch ładunków elektrycznych od miejsc o wyższych do miejsc o niższych potencjałach. Jeżeli weźmiemy pod uwagę dwa przekroje przewodnika

o potencjałach  $V_1$  i  $V_2$ , to praca zużyta na przeniesienie  $Q$  jednostek ładunku z przekroju 1 do przekroju 2 będzie (rys. 55):

$$A = (V_1 - V_2) Q = VQ.$$

O ile przez rozważany przewodnik płynie prąd stały o natężeniu  $J$ , to w ciągu  $t$  sekund z przekroju 1 do przekroju 2 przeniesione zostanie  $Jt$  jednostek elektryczności, czyli:

$$Q = Jt; A = VJt$$

Zakładając:  $V = 1$  wolt,  $J = 1$  amper,  $t = 1$  sekunda, a więc  $Q = 1$  kulomb, otrzymamy:

$A = 1$  dżaul =  $1$  volt  $\cdot$   $1$  kulomb =  $1$  volt  $\cdot$   $1$  amper  $\cdot$   $1$  sek., czyli praca prądu w danym przewodniku, wyrażona w dżaulach, równa się:

1) iloczynowi z ilości elektryczności (w kulombach), która przepłynęła przez dowolny przekrój przewodnika, przez różnicę potencjałów (w woltach), na końcach tego przewodnika;

2) albo iloczynowi z natężenia prądu, wyrażonego w amperach przez czas trwania prądu w sekundach i przez różnicę potencjałów wyrażoną w woltach.

**Moc prądu.** Aby otrzymać moc prądu, t. j. pracę wykonaną w jednostkę czasu, musimy podzielić wielkość pracy przez czas, w ciągu którego została ona wykonana:

$$P = \frac{A}{t} = VJ$$

Zakładając  $V = 1$  wolt,  $J = 1$  amper, otrzymamy:

$$P = \frac{1 \text{ dżaul}}{1 \text{ sek.}} = 1 \text{ watt}$$

Jak widzimy, moc prądu w przewodniku, wyrażona w watach, jest iloczynem różnicy potencjałów na końcach tego przewodnika — w woltach przez natężenie prądu w tym przewodniku — w amperach, t. j.:

$$1 \text{ watt} = 1 \text{ volt} \cdot 1 \text{ amper}$$

**Prawo Joule'a.** Każdy, nawet najdoskonalszy przewodnik, posiada pewien opór zależny od przekroju, długości i oporności właściwej przewodnika. Jeżeli po przewodniku płynie prąd, to pewna część energii zostanie stracona na pokonanie tego oporu, wskutek czego następuje spadek napięcia w myśl prawa Ohma:

$$V_A - V_B = J R$$

proporcjonalny do natężenia prądu i oporności przewodnika. Jak wiemy jednak, energia jest niezniszczalna, może ona jedynie przechodzić w inne rodzaje energii. W tym wypadku kosztem pracy, zużytej na pokonanie oporu, wytwarza się ciepło, przewodnik się nagrzewa. W niektórych wypadkach (grzejniki, piecyki elektr., żelazka i t. p.) umyślnie stosujemy duże oporności, gdyż chodzi nam specjalnie o zamianę energii elektrycznej w ciepłą, w innych jednakże staramy się możliwie zapobiec stracie energii elektrycznej, dając przewody o dużym przekroju i z materiałów o małej oporności. Całkowicie jednak uniknąć tej niepożądaney przemiany energii elektrycznej w ciepłą nigdy się nie udaje.

Ilość pracy, jaka zostaje stracona na pokonanie oporu, możemy znaleźć w następujący sposób: jeżeli po przewodniku płynie prąd o natężeniu  $J$  przy różnicy potencjałów  $V$ , to w ciągu  $t$  sekund wykona on pracę

$A = V J t$  dżuli, ponieważ  $V = J R$ , więc  $A = J^2 R t$ . Jeżeli kosztem tej pracy otrzymamy

tylko pewną ilość ciepła, to ciekawą jest rzeczą, jak dużo tego ciepła będzie. Otóż Joule przy pomocy specjalnie skonstruowanego kalorymetru znalazł ścisłą zależność pomiędzy ilością wydzielonego ciepła przez przewodnik pod prądem, a pracą tegoż prądu. Zależność ta przedstawia się w następujący sposób:

$$Q \text{ kal} = 0,24 J^2 Rt$$

gdzie  $Q$  — ilość ciepła wydzielonego wyrażona w małych kalorjach.

Aby zmniejszyć straty na nagrzewanie, musimy dawać przewody odprowadzające prąd o odpowiednio dużym przekroju, stosownym do wielkości przepływającego prądu. Niekiedy jednak obliczony dla danego natężenia prądu przewodnik mógłby się zbyt szybko nagrząć, a nawet stopić wskutek t. zw. **zwarcia** lub **krótkiego spięcia**. Bywa to wtedy, gdy izolacja zostanie uszkodzona i przewody, odprowadzające prąd ze źródła zetkną się ze sobą, lub też jeden z nich zostanie połączony z ziemią. Ponieważ oporność krótkozwartego obwodu jest zazwyczaj bardzo mała, więc popłynie po nim tak duży prąd, że nawet przewody obliczone z pewnym zapasem okażą się za cienkie do jego przepływu. Niech np. siła elektromotoryczna źródła wynosi 120 wolt, a opór krótkozwartego obwodu 0,1 oma, to w myśl prawa Ohma, prąd, jaki po tym obwodzie popłynie, wynosi:

$$J = \frac{120}{0,1} = 1200 \text{ amp.}$$

A ponieważ we wzorze na ilość ciepła  $J$  występuje w drugiej potęgce, więc widzimy jak duży wpływ wywiera nieznaczne nawet zwiększenie natężenia prądu na nagrzewanie się przewodów.



W celu zabezpieczenia się w takich wypadkach przed uszkodzeniem przewodów, przy zaciskach źródeł prądu włączone są **bezpieczniki** t. j. druciki, których przekrój jest dużo mniejszy, niż przekrój przewodów. W chwili przepływu prądu większego niż normalny dla danego przekroju przewodów, druciki te wskutek większej oporności (mniejszy przekrój) silnie się nagrzewają i stapiają, dzięki czemu następuje przerwa w obwodzie.

### Z a d a n i a.

1) Prąd o natężeniu 8 amp. płynie po przewodniku w ciągu 4-ch godzin. Jaka ilość elektryczności przepłynęła przez ten czas po przewodniku?

$$Q = Jt = 8 \cdot 4 = 32 \text{ amperogodziny} = \\ = 8 \cdot 4 \cdot 60 \cdot 60 \text{ kulombów} = 115200 \text{ kulombów.}$$

2) Jaka jest gęstość prądu w przewodniku o średn. 0,5 cm., jeżeli w ciągu pół godziny przepłynęło przez przewodnik 141300 kulombów?

Natężenie prądu w przewodniku:

$$J = \frac{Q}{t} = \frac{141300}{30 \cdot 60} = 78,5 \text{ ampera}$$

Gęstość prądu w przewodniku:

$$i = \frac{J}{S} = \frac{J}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{78,5 \cdot 4}{3,14 \cdot 25} = 4 \text{ ampery}$$

3) Obliczyć spadek napięcia na końcach linii telegraficznej miedzianej o dł. 500 m. i przekroju 4 mm.<sup>2</sup>, przy natężeniu prądu 10 amp.

$$R_l = \rho \frac{l}{s} = 0,0175 \cdot \frac{500}{4} = 2,2 \Omega$$

Spadek napięcia na linii będzie:

$$V = JR_l = 10 \cdot 2,2 = 22 \text{ wolty.}$$

4) Obliczyć spadek napięcia na końcach przewodnika o długości 57 m. przy gęstości prądu w nim 4 amp.

$$V = JR = \frac{is\rho l}{s} = 0,0175 \cdot 57 \cdot 4 = 4 \text{ wolty.}$$

5) Obliczyć przekrój przewodnika miedzianego łączącego elektrownię o napięciu 230 volt z budynkiem mieszkalnym, w którym są załączone 220 woltowe żarówki, jeżeli z elektrowni dopływa prąd o natężeniu 10 amp. i odległość elektrowni od budynku wynosi 228 m.

Spadek napięcia pomiędzy budynkiem i elektrownią:

$$JR_l = 30 - 220 = 10 \text{ woltów.}$$

Oporność przewodów:

$$R_l = \frac{10}{10} = 1 \text{ om.}$$

Przekrój przewodów:

$$S = \rho \frac{l}{R} = \frac{1}{57} \cdot \frac{2 \cdot 228}{1} = 8 \text{ mm}^2$$

6) Ile ciepła wydzieli 50 wattowa żarówka w pół godziny?

$$Q = 0,24 \cdot Wt = 0,24 \cdot 50 \cdot 30 \cdot 60 = 2160 \text{ kal.}$$

7) Prąd o natężeniu 5 amp. płynie po przewodniku o oporności 10 omów. Przewodnik ten zanurzony jest do naczynia zawierającego litr wody o temp. 0° C. Jaka będzie temperatura wody po upływie 10 minut?

Ilość ciepła wydzielonego w przewodniku:

$$Q = 0,24 J^2 R t = 0,24 \cdot 25 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 60 = 36000 \text{ kal.}$$

Ponieważ dla podniesienia temp. 1 litra wody o  $1^\circ$  potrzeba 1000 kal., więc temp. po upływie 10 min. wyniesie:

$$t = \frac{36000}{1000} = 36^\circ$$

8) Prądnicą o napięciu na zaciskach 220 woltów dostarcza energję do 50-konnego elektromotoru odległego o 500 m. Obliczyć przekrój przewodów łączących i napięcie na zaciskach elektromotoru, jeżeli moc stracona w przewodach stanowi 20% mocy elektromotoru.

Moc stracona w przewodach:

$$P_s = 50 \cdot 0,20 = 10 \text{ KM} = 10 \cdot 736 \text{ watt} = 7360 \text{ watt.}$$

Moc prądniczy:

$$P_p = 50 + 10 = 60 \text{ KM} = 60 \cdot 736 = 44160 \text{ watt.}$$

Natężenie prądu w obwodzie:

$$J = \frac{44160}{220} = 200 \text{ amp.}$$

Oporność przewodów obliczymy, przyjmując, że cała stracona w linii energia elektryczna przekształciła się w energję cieplną:

$$R_l J^2 = P_s; R_l = \frac{P_s}{J^2} = \frac{7360}{200^2} = 0,18 \Omega$$

Przekrój przewodów:

$$R_l = \rho \frac{l}{S}; S = \frac{\rho l}{R_l} = \frac{1}{57} \cdot \frac{2 \cdot 500}{0,18} = 100 \text{ mm}^2 = 1 \text{ cm}^2.$$

Spadek napięcia w linii:

$$V_l = J R_l = 200 \cdot 0,18 = 36 \text{ wolt.}$$

Napięcie na zaciskach elektromotoru:

$$V_e = V_p - V_l = 220 - 36 = 184 \text{ woltów.}$$

### **Magnetyzm i elektromagnetyzm.**

**Magnesy naturalne i sztuczne.** W przyrodzie spotykamy w niektórych miejscowościach pokłady rudy żelaznej ciemno-brunatnego lub czarnego koloru, zwanej magnetytem, o składzie chemicznym  $Fe_3 O_4$ . Niektóre kawałki tej rudy posiadają specjalne własności polegające na tem, że przyciągają one kawałki żelaza, stali lub niklu. Takie kawałki rudy nazywamy magnesami naturalnymi od nazwy miasta Magnezja w okolicy której, według podań, ruda taka pierwszy raz była znalezioną.

W praktyce stosuje się przeważnie magnesy sztuczne wyrabiane ze stali, posiadające te same własności co naturalne. Magnesy sztuczne bywają różnych kształtów; częściej spotykane przedstawione są na rys. 56.

**Bieguny magnetyczne i ich własności.** O ile będziemy dotykali różnych miejsc magnesu kawałkiem żelaza, to przekonamy się, że najmocniej będzie on przyciągany przy końcach magnesu, słabiej ku środkowi, przyczem w środku istnieć będzie powierzchnia, zwana obojętną lub neutralną, gdzie przyciąganie przejawiać się nie będzie. Miejsca, najsilniej przyciągające dany kawałek żelaza, nazywamy powierzchniami biegunowymi lub wprost biegunami magnesu. Prosta, łącząca bieguny, stanowi oś magnesu (rys. 57).

Sztabka o własnościach magnetycznych, zawieszona na nitce umocowanej w jej środku ciężkości, ustawi

się zawsze w pewnym określonym położeniu w stosunku do osi ziemi, mianowicie jeden jej biegun wskazuje mniej więcej na północ, drugi—na południe (rys. 58). Musi więc istnieć pewna zasadnicza różnica pomiędzy jakościami magnetyzmu znajdującego się w obu biegunach. Dla rozróżnienia, biegun zwracający się na północ nazywamy północnym ( $N$ ), na południe — południowym biegunem magnesu ( $S$ ). Biegun północny oznaczamy także znakiem plus, południowy — znakiem minus. Przy zbliżaniu magnesu naprzemian jednym i drugim biegunem do innego magnesu zawieszzonego swobodnie w płaszczyźnie poziomej, zauważymy, że bieguny różnoimiennie tych magnesów będą się wzajemnie przyciągały, jednoimiennie — odpychały.

W biegunach magnesu są ześrodkowane jednakowe co do wielkości, lecz przeciwne co do znaków ilości magnetyzmu zwane **masami magnetycznymi**; oznaczamy je „ $+M$ ” i „ $-M$ ”; te masy magnetyczne nie są jednak skupione na końcach sztabek, lecz w pewnej od nich odległości (mniej więcej w odległości połowy szerokości magnesu).

Nasuwa się obecnie pytanie, czy bieguny można od siebie oddzielić, tak jak ładunki elektryczne. Okazuje się, że jeśli sztabkę namagnesowaną przeciąć wzdłuż linii obojętnej, to na obu jej częściach w miejscu przecięcia wytwarzają się bieguny znaków przeciwnych i każda z tych części staje się nowym magnesem. Dzieląc w dalszym ciągu sztabkę, otrzymamy zawsze magnesy dwubiegunowe. Takie systemy układów, których bieguny nie dadzą się od siebie oddzielić nazywamy **dwubiegunowemi**.

**Istota magnetyzmu.** Zjawisko powyższe naprowadziło na myśl, że stal, żelazo, nikiel i t. d. posiadają w swoim składzie drobne cząsteczki magnetyczne, t. zw. **magnetony**, porozrzucane bezładnie tak, że wypadko-

wa ich działania magnetycznego równa jest zeru. Działanie to występuje dopiero po uporządkowaniu cząsteczek czyli po skierowaniu ich osi mniej więcej w jednym kierunku. Masy magnetyczne na biegunach będą największe, gdy wszystkie bieguny cząsteczek zostaną zwrócone w jedną stronę. Tem się tłumaczy t. zw. stan nasycenia magnetycznego, kiedy dalsze namagnesowywanie sztabki okazuje się bezcelowe, gdyż nie zwiększa jej własności magnetycznych. Zwykły sposób magnesowania sztabki przez pocieranie jej jednym biegunem jekiegoś magnesu ciągle w tę samą stronę lub dwoma od środka ku końcom sztabki (rys. 59) jest niczem innym, jak porządkowaniem magnesów cząstkowych.

Przy wprowadzeniu cząsteczek magnetycznych w stan bezład, działanie magnetyczne powinno ustać; istotnie, sztabka namagnesowana, po ogrzaniu t. j. po wzbudzeniu szybszego ruchu cząsteczek, utracą nabyte własności magnetyczne.

Teorja powyższa z biegiem czasu uległa zmianom i dziś istnienie magnetyzmu jest ściśle związane z elektrycznością, a mianowicie z krążeniem elektronów po swych orbitach. Jak zobaczymy później, prąd elektryczny, krążący po przewodniku, wytwarza także pole magnetyczne, zapomocą którego można namagnesować sztabkę żelaza lub stali.

Przy rozpatrywaniu zjawisk magnetycznych będziemy jednakże dla większej prostoty stosować nadal poprzednią teorję czyli uważać magnetyzmy za coś materialnego.

Jak widzimy, uporządkowany układ magnesów cząstkowych tworzy zawsze magnes o 2-ch biegunach niedających się od siebie oddzielić. Możemy sobie jednak wyobrazić magnes tak długi, aby działanie drugiego bieguna, przynajmniej na najbliższe otocze-

nie, można było pominąć. W dalszym ciągu teorii magnetyzmu będziemy mieli do czynienia tylko z takimi jakby jednobiegunowymi magnesami.

**Prawo Coulomba.** Działanie wzajemne 2-ch biegunów magnetycznych podlega temu samemu prawu, według którego działają na siebie z odległości dwa ładunki elektryczne (rys. 60). Siła  $F$ , z jaką jeden biegun magnetyczny przyciąga lub odpycha drugi, jest wprost proporcjonalna do iloczynu z mas magnetycznych obu biegunów  $M_1$  i  $M_2$ , oraz odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości pomiędzy nimi, co wyraża się wzorem:

$$F = \frac{M_1 M_2}{\mu r^2}$$

przyczem znak siły zależy od znaków mas  $M_1$  i  $M_2$ , współczynnik  $\mu$ , zwany **zdolnością** albo **przenikliwością magnetyczną**, charakteryzuje własności magnetyczne, tak samo jak stała dielektryczna charakteryzowała własności elektryczne ośrodka pomiędzy ładunkami elektrycznymi. Różnica pomiędzy temi wielkościami polega na tem, że  $\mu$  może przybierać wszelkie wartości, zarówno większe jak i mniejsze od jedności, gdy tymczasem  $\epsilon$  mogło być tylko większe lub równe jedności.

**Jednostka masy magnetycznej.** Ze wzoru Coulomba możemy określić abso tną jednostkę masy magnetycznej, zakładając  $F = 1$  dyna,  $r = 1$  cm.,  $\mu = 1$ , i  $M_1 = M_2 = 1$ . Absolutną jednostką masy magnetycznej będzie więc taka masa magnetyczna, która w próżni równą sobie przyciąga lub odpycha z odległości 1 cm. z siłą jednej dyny. Wprowadzona została również jednostka techniczna masy magnetycznej: 1 weber  $= 10^8$  J. C. G. S. Jednostka ta jednak prawie się nie używa.

**Pole magnetyczne i linje sił.** Jeżeli nasypimy na papier opiłki żelaznych i umieścimy pod nim magnes, to zauważymy, że po potrząśnięciu papieru opiłki ułożą się wzdłuż pewnych linii prawidłowych skierowanych ku biegunom. W otoczeniu każdego bieguna działają więc pewne siły, które nazywamy **siłami magnetycznymi**. Zasadniczo działanie biegunów sięga na odległość nieograniczoną, jednakże przy pomocy naszych zwykłych przyrządów to działanie może być zaobserwowane tylko w niewielkich odległościach. Przestrzeń, w której działają siły magnetyczne, nazywamy **polem magnetycznym**, a linje, wzdłuż których układają się opiłki pod wpływem działania magnesu — **linjami sił**. Inaczej, linje sił magnetycznych są to tory, po których poruszałaby się swobodna jednostka północnej (dodatkowej) masy magnetycznej pod wpływem sił pola. Linje sił pola magnetycznego różnią się od linii sił pola elektrycznego tem, że podczas gdy linje sił pola elektrycznego opierają się jedynie na powierzchni przewodników nie przenikając ich, a więc natężenie pola wewnątrz przewodnika było równe zeru, linje sił pola magnetycznego wychodzą z bieguna północnego i wchodzą do południowego przenikając przez całą długość magnesu (rys. 61).

Linje sił pola magnetycznego wytworzonego przez magnes kształtu podkowy, mający na swych końcach nasady biegunowe (rys. 62), tworzą obwód zamknięty i w szczelinie pomiędzy nasadami biegunowymi mają taki kierunek, jakby szły pomiędzy wzajemnie przyciągającymi się różnoimiennymi biegunami 2-ch oddzielnych magnesów. Linje sił pola magnetycznego wytworzonego przez dwa magnesy zwrócone ku sobie jednoimiennymi biegunami, w szczelinie pomiędzy temi biegunami mają taki kształt, jakby się wzajemnie odpychały.



**Natężenie pola magnetycznego i jego jednostka.**  
Umieścimy w punkcie  $A$  (rys. 63) pola magnetycznego, w odległości  $r$  od wytwarzającego je bieguna  $M$  idealnego magnesu, biegun północny o masie  $m$ . Siła, jaka będzie działać na wprowadzony biegun, wyniesie:

$$F = \frac{Mm}{\mu r^2}$$

zmieni ona swą wartość, gdy zamiast bieguna  $m$  wprowadzimy inny biegun o masie  $m_1$ , natomiast stosunek siły działającej na biegun umieszczony w pewnym punkcie pola do masy magnetycznej zawartej w tym biegunie pozostaje zawsze wielkością stałą. Wielkość tę, charakteryzującą pole w każdym jego punkcie, nazywamy **natężeniem pola magnetycznego**. Miarą natężenia jest więc siła, z jaką działa pole na umieszczony w nim jednostkowy biegun północny. Według tego określenia natężenie będzie:

$$H = \frac{F}{m} = \frac{M}{\mu r^2}$$

Kierunek natężenia jest zgodny z kierunkiem sił pola.

Z powyższego możemy określić absolutną jednostkę natężenia pola magnetycznego. Będzie to takie natężenie, przy którym na jednostkę północną masy magnetycznej, umieszczoną w danym punkcie pola, działa siła równa jednej dynie. Jednostkę tę nazwano **gaussem**. Jest to jednostka mała, gdyż przeciętny elektromagnes wytwarza pole o natężeniu 10 — 14000 gausów. Za pomocą bardzo silnych elektromagnesów udaje się osiągnąć pole o natężeniu dochodzącem do 100000 gausów.

Przy natężeniu pola równem 1 gausowi przyjmujemy, że na każdy  $\text{cm}^2$  powierzchni prostopadłej do kie-

runku linii sił pola przypada jedna magnetyczna linia sił. Na tej zasadzie możemy mierzyć natężenie pola magnetycznego liczbą linii sił magnetycznych, przechodzących przez 1 cm.<sup>2</sup> powierzchni prostopadłej do kierunku linii sił.

**Potencjał magnetyczny.** Podobnie do potencjału elektrycznego, wyrażamy potencjał magnetyczny w danym punkcie pola zapomocą wzoru:

$$V = \frac{M}{\mu r}$$

gdzie  $M$  jest wielkością masy magnetycznej bieguna, który wytworzył to pole,  $r$  — odległość danego punktu pola od bieguna,  $\mu$  — przenikliwość magnetyczna ośrodka.

Wielkość potencjału magnetycznego mierzy się ilością pracy potrzebnej do przeniesienia dodatniej jednostki masy magnetycznej z danego punktu pola do nieskończoności lub do punktu o potencjale równym zeru.

Obliczmy teraz, jaką pracę należałoby wykonać przy usunięciu z pola magnetycznego magnesu o bardzo małej długości  $l$ , umieszczonego w odległości  $r$  od bieguna.

Praca ta sprowadza się do usunięcia z tegoż pola mas  $+m$  i  $-m$  jego biegunów północnego i południowego i będzie równa:

$$A = mV_1 - mV_2.$$

gdzie  $V_1$  i  $V_2$  — potencjały punktów, w których znajdują się bieguny magnesu:

$$V_1 = \frac{M}{\mu \left( r + \frac{l}{2} \right)}; \quad V_2 = \frac{M}{\mu \left( r - \frac{l}{2} \right)};$$

$$A = \frac{M m l}{\mu \left[ r^2 - \left( \frac{l}{2} \right)^2 \right]}$$

ponieważ  $r \gg l$  więc możemy napisać:

$$A = \frac{M m l}{\mu r^3} = H m l$$

**Pole magnetyczne ziemi, igła magnetyczna.** Kula ziemską zachowuje się jak magnes o biegunie magnetycznym południowym na północnej półkuli i północnym na południowej półkuli. Natężenie pola magnetycznego wytworzonego przez kulę ziemską zależy od szerokości geograficznej danego punktu i dla ziem polskich wynosi około 0,4 gausa.

Jeżeli umieścimy magnes w kształcie igły na osi pionowej przechodzącej przez jego środek ciężkości, to zajmie on ściśle określony kierunek, a mianowicie ustawi się w płaszczyźnie południka magnetycznego, tworząc pewien kąt z płaszczyzną południka geograficznego (rys. 64 a). Ten kąt odchylenia czyli zбочenia igły magnetycznej na wschód lub zachód od południka geograficznego nazywamy **deklinacją**. Deklinacja ma różną wartość dla różnych miejsc na kuli ziemskiej, nadto w tem samym miejscu z biegiem czasu ulega zmianie. Dla Warszawy deklinacja wynosi obecnie około  $5^\circ$  na zachód; dalej ku wschodowi Europy maleje i na przykład na Uralu jest równa zeru.

Kąt, który igła magnetyczna, zawieszona w środku ciężkości, tworzy z płaszczyzną poziomą, nazywamy kątem nachylenia albo **inklinacją** (rys. 64 b). Inklinacja w różnych miejscowościach na kuli ziemskiej zmienia się od  $0^\circ$  do  $90^\circ$ ; na biegunach magnetycznych igła stoi pionowo (inklinacja równa jest  $90^\circ$ ), natomiast na

równiku — poziomo (inklinacja jest równa  $0^\circ$ ). Dla Warszawy inklinacja wynosi  $66^\circ$ .

Własność magnesów ustawiania się w płaszczyźnie południka magnetycznego pod wpływem magnetyzmu ziemskiego znalazła niezmiernie ważne zastosowanie w drogowskazach magnetycznych (kompasach albo busolach).

W kompasie igła magnetyczna jest osadzona na pionowej osi przechodzącej przez jej środek ciężkości (rys. 65). W ten sposób siły pionowe działające na igłę równoważą się z reakcją osi i odchylenie igły powoduje tylko składowa pozioma natężenia pola ziemskiego. Zależnie od szerokości geograficznej, wielkość tej składowej waha się w granicach od 0,17 do 0,22 gausa. Jeżeli igła magnetyczna w każdym swym biegunie posiada po  $m$  jednostek, to przy wyprowadzeniu jej z płaszczyzny południka magnetycznego będą działały na nią dwie siły równe, równoległe i przeciwnie skierowane, każda o wartości  $F = Hm$ , zaczepione w biegunach igły (takie dwie siły nazywamy **parą sił**). Pod działaniem tej pary sił igła magnetyczna będzie starała się wrócić do położenia poprzedniego.

W kompasie pod igłą znajduje się nieruchoma tarcza z podziałką, na której zapomocą igły magnetycznej orjentujemy się względem południka magnetycznego danej miejscowości, a więc zarazem względem stron świata. Jeżeli chcemy znać dokładnie kierunek południka geograficznego, to musimy uwzględnić jeszcze wielkość deklinacji dla danej miejscowości. Na okrętach orjentowanie się zapomocą kompasu względem południka geograficznego jest utrudnione tem, że prócz deklinacji musimy przyjąć pod uwagę pewien kąt odchylenia igły od płaszczyzny południka magnetycznego, zwany **dewiacją**, spowodowany wpływem pola magnetycznego wytworzonego przez żelazny korpus okrętu

na igłę kompasu. W czułych elektrycznych przyrządach mierniczych, naprzykład w czułych galwanometrach, w których zastosowana jest igła magnetyczna, zachodzi potrzeba unicestwienia działania pola magnetycznego ziemi na igłę magnetyczną przyrządu. Osiąga się to zapomocą zastosowania w tych przyrządach układu igieł magnetycznych, zwanego **igłą astatyczną**.

Igła astatyczna składa się z 2-ch igieł magnetycznych o jednakowych wymiarach i jednakowo namagnesowanych. Igły te są osadzone na wspólnej osi i zwrócone do siebie biegunami różnoimiennymi (rys. 66). Igła astatyczna, zawieszona na nitce, zachowuje położenie obojętne względem południka magnetycznego; tłumaczy się to tem, że na taką igłę działają 2 pary sił równe i przeciwnie, skierowane, a więc znoszące swe działanie. W czułych galwanometrach jedna igła układu astatycznego  $ns$  jest umieszczona wewnątrz uzwojenia, po którym płynie prąd elektryczny, druga  $n's'$  — nazewnątrz. Takie rozmieszczenie igieł nietylko unicestwia wpływ pola magnetycznego ziemi, lecz także zwiększa czułość galwanometru, gdyż obie igły, pod wpływem pola magnetycznego przez ten prąd wytworzonego, będą odchylały się w tym samym kierunku (rys. 67).

**Moment magnetyczny magnesu.** Igła magnetyczna umieszczona w polu magnetycznym ziemi, pod wpływem sił pola działających na jej różnoimiennie bieguny, nie otrzyma ruchu postępowego, lecz jak zaznaczyliśmy rozpatrując magnetyzm ziemski, ustawi się w płaszczyźnie południka magnetycznego, a wychylona z tego położenia wróci doń pod działaniem sił pola. Tak samo zachowa się igła magnetyczna w każdym jednorodnym polu, przyjmie mianowicie pewne określone położenie i dla wyprowadzenia jej z niego potrzeba będzie wykonać pewną pracę.

Umieścimy w dowolnem polu magnetycznem (rys. 68a i 68b) bardzo krótki t. zw. elementarny magnes i obróćmy go dokoła środka o kąt  $\alpha$ . W otoczeniu magnesu, a więc w bardzo małej przestrzeni każde pole możemy uważać za jednostajne.

Jeżeli oznaczymy potencjał w punkcie  $C$  przez  $V_C$  w punktach  $A$  i  $B$  przez  $V_A$  i  $V_B$ , a natężenie pola przez  $H$ , to:

$$V_A = V_C + \frac{Hl}{2}; \quad V_B = V_C - \frac{Hl}{2}$$

potencjały w punktach  $E$  i  $D$  będą:

$$V_E = V_C + \frac{Hl}{2} \cos \alpha; \quad V_D = V_C - \frac{Hl}{2} \cos \alpha$$

obracając więc magnes o kąt  $\alpha$ , przenieśliśmy masy magnetyczne  $+m$  i  $-m$  z punktu  $A$  do  $E$  i z  $B$  do  $D$ ; wykonaliliśmy przy tem pracę:

$$\begin{aligned} A &= m \left[ V_E - V_A \right] - m \left[ V_D - V_B \right] = \\ &= m \left[ V_C + \frac{Hl}{2} \cos \alpha - V_C - \frac{Hl}{2} \right] - \\ &- m \left[ V_C - \frac{Hl}{2} \cos \alpha - V_C + \frac{Hl}{2} \right] = \\ &= mH \frac{l}{2} \cos \alpha - mH \frac{l}{2} + mH \frac{l}{2} \cos \alpha - \\ &- mH \frac{l}{2} = Hlm \cos \alpha - Hlm \end{aligned}$$

gdy  $\alpha = 90^\circ$ , to:  $A = -Hlm$ ; praca ujemna, gdyż wykonaliliśmy ją wbrew siłom pola.

W iloczynie  $Hml$  dwie wielkości:  $m$  i  $l$  nie zależą od położenia magnesu i są jego charakterystycznymi wielkościami stałymi. Iloczyn z masy magnetycznej  $m$ , znajdującej się w każdym z biegunów magnesu przez odległość pomiędzy biegunami  $l$  nazywamy **momentem magnetycznym magnesu** i oznaczamy literą  $M$ . Iloczyn  $HM$  nazywamy **momentem kierującym pola**. Gdy  $M = 1$ , to wielkość momentu kierującego równa się wielkości natężenia pola, możemy więc powiedzieć, że miarą natężenia pola jest moment kierujący, jaki wywiera ono na magnes o momencie równym 1.

Zauważymy jeszcze, że praca, którą wykonujemy, obracając krótki magnes o kąt  $90^\circ$ , równa się pracy wykonanej przy usunięciu go z pola do nieskończoności.

**Wpływ ciał obcych na układ linii sił magnetycznych.** Pole magnetyczne zmienia swój kształt, jeżeli wprowadzimy do niego jakieś ciało; niema bowiem w przyrodzie ciał, któreby nie wywierały wpływu na pole magnetyczne. Należy przytem odróżnić dwie charakterystyczne deformacje pola magnetycznego.

Wprowadźmy do pola jednorodnego t. j. takiego, w którym natężenia we wszystkich punktach są równe i równoległe (np. pole ziemskie w niewielkiej przestrzeni może być uważane za jednorodne), kawałek żelaza. Przy pomocy opiłków żelaznych zauważymy, że linje sił wygną się, starając się możliwie skupić wewnątrz wprowadzonego kawałka żelaza i jaknajdłużej w nim przebywać, t. j. żelazo ustawi się najdłuższym swym wymiarem w kierunku linii sił (rys. 69). Kawałek żelaza o odpowiedniej masie, pozostawiony swobodnie w takim polu, zostanie wciągnięty przez linje sił pomiędzy bieguny. Ciała, które zachowują się w polu magnetycznym podobnie do żelaza nazywamy

ciałami **paramagnetycznymi**; dla tych ciał przenikliwość magnetyczna  $\mu > 1$  (cer, platyna, aluminium i wszystkie sole żelaza). Jeżeli teraz wprowadzimy do pola magnetycznego kawałek bizmutu, to linje sił wygną się nazewnątrz, starając się go ominąć, przyczem bizmut ustawi się swym najdłuższym wymiarem prostopadle do linii sił pola, a umieszczony w polu, będzie odpychany przez linje sił w kierunku takim, w którym natężenie jest coraz mniejsze. Ciała, zachowujące się w polu magnetycznym podobnie do bizmutu, nazywamy ciałami **djamagnetycznymi**. Dla tych ciał  $\mu < 1$  (miedź, ołów, rtęć i inne). Nietylko ciała stałe, ale także płyny i gazy wykazują działanie para- lub djamagnetyczne (prawie wszystkie płyny, oprócz roztworów, mają własności djamagnetyczne). Z pośród ciał wydzielono pewną grupę o szczególnie silnych własnościach paramagnetycznych i nazwano je ciałami **ferromagnetycznymi**. Dla tych ciał  $\mu \gg 1$  i wynosi kilka tysięcy, podczas gdy dla ciał paramagnetycznych  $\mu$  nie przekracza 100. Do ciał ferromagnetycznych należą: żelazo, nikiel, chrom, mangan i kobalt.

Ciała ferromagnetyczne odznaczają się tem, że wprowadzone do pola magnetycznego wybitnie skupiają linje sił i stają się same magnesami, np. sztabka żelaza lub stali umieszczona w polu magnetycznym staje się magnesem, przyczem na końcu zbliżonym do bieguna wytwarzającego to pole, tworzy się biegun znaku przeciwnego, na końcu przeciwległym — biegun tego samego znaku. Taki sposób magnesowania nazywamy magnesowaniem przez **indukcję**.

Po usunięciu pola żelazo miękkie utracą nabyte własności magnetyczne, stal natomiast zachowuje je nadal.

Pomiędzy reagowaniem rozmaitych ciał umieszczonych w polu magnetycznym na linje sił tego pola,



a reagowaniem warstwic gleby na przepływające przez nie strumyki wody można przeprowadzić następującą analogję:

### Tabela porównawcza

Jeżeli pod zbiornikiem z wodą, w dnie którego znajdują się otwory, będziemy mieli warstwicę gleby piaszczystej i glinianej (rys. 70) to zauważymy, że strumyki wody spadające na warstwicę:

1. jakby ssane przez warstwicę piaskową (1), będą zmieniały swój kierunek w stronę środka warstwicy,
2. będą splywały dokoła warstwicy glinianej (2), zmieniając swój kierunek w stronę od środka warstwicy.

Jeżeli w polu magnetycznym umieścimy sztabkę z materiałów paramagnetycznego i djamagnetycznego (rys. 71), to zauważymy, że linje sił pola, napotykając te sztabki będą:

1. skupiane wewnątrz sztabki paramagnetycznej (1),
2. odpychane przez sztabkę djamagnetyczną (2).

**Natężenie i strumień indukcji magnetycznej.** Jeżeli do pewnego ośrodka, dla którego  $\mu = 1$ , i w którym istnieje pole magnetyczne, wprowadzimy jakieś ciało podlegające namagnesowaniu, to pod wpływem sił pola nastąpi przesunięcie w nim mas magnetycznych, a mianowicie dodatnich w kierunku pola, ujemnych — w przeciwnym. W rezultacie otrzymamy na jednym końcu danego ciała biegun dodatni, na drugim — ujemny magnesu.

Wielkość przesuniętych mas magnetycznych jest proporcjonalna do natężenia pola. Zależność pomiędzy

natężeniem pola  $H$  i przesuniętą masą magnetyczną  $\sigma$  rozłożoną na 1 cm.<sup>2</sup> powierzchni normalnej do kierunku pola, wyraża się:

$$\sigma = \frac{\mu}{4\pi} H; \text{ skąd}$$

$$4\pi\sigma = \mu H = B$$

gdzie  $\mu$  — przenikliwość magnetyczna danego ciała.

Wielkość  $4\pi\sigma$ , oznaczana literą  $B$ , jest miarą **natężenia indukcji magnetycznej** lub wprost **indukcji magnetycznej** i mierzy się tak, jak natężenie pola w gausach. Dla ciał, dla których  $\mu = 1$ ,  $B = H$ , natężenie więc jest równe indukcji. Należy zwrócić uwagę, że główną rolę w zjawiskach magnetycznych odgrywa indukcja i wielkość  $H$  można uważać jako indukcję w ośrodkach, dla których  $\mu = 1$ ; w ten sposób będziemy mieli do czynienia wyłącznie z indukcją w rozmaitych ośrodkach.

W wypadku gdy  $\mu > 1$  zamiana  $H$  na  $B$  charakteryzuje się zjawiskiem analogicznym do tego, jakie zachodziło przy wprowadzeniu do pola magnetycznego sztabki żelaznej: tworzy się rodzaj osłony magnetycznej, pochłaniający w siebie linję sił (rys. 72 b). Ma to zastosowanie przy czułych galwanometrach, gdzie daje się osłonę z miękkiego żelaza w celu uniknięcia wpływu zewnętrznych pól magnetycznych (rys. 72 a). Dla ciał djamagnetycznych  $\mu < 1$ , wskutek czego osłabiają one pole, rozpraszając linję sił.

Jeżeli przedstawimy wykreślnie zależność pomiędzy  $B$  i  $H$ , to otrzymamy linję prostą (rys. 73), przyczem obszar  $I$  odpowiada ciałom djamagnetycznym, obszar  $II$  — ciałom para- i ferromagnetycznym. Prosta graniczna odpowiada próżni ( $\mu = 1$ ).

Wielkość indukcji możemy mierzyć tak samo jak i natężenie liczbą linji magnetycznych indukcji prze-

chodzących przez 1 cm.<sup>2</sup> powierzchni prostopadłej do kierunku linii sił.

Wyobraźmy sobie w polu jednorodnem powierzchnię  $S$  (rys. 74), przez którą przenikają linie indukcji; jeżeli natężenie indukcji wynosi  $B$  gausów, a kąt jaki tworzą linie indukcji z powierzchnią rozpatrywaną jest  $\alpha$ , to przez 1 cm.<sup>2</sup> powierzchni przejdzie  $B \cos \alpha$  linii sił, a przez całą powierzchnię:

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

Wielkość  $\Phi$  nazywamy **strumieniem indukcji magnetycznej** lub krócej **strumieniem magnetycznym** przechodzącym przez powierzchnię  $S$ . Jeżeli powierzchnia jest prostopadła do kierunku linii indukcji, to  $\cos \alpha = 1$ ; wówczas:

$$\Phi = B S$$

Strumień indukcji wyobrażamy sobie jako wiązkę linii indukcji, przecinających daną powierzchnię. Absolutną jednostką strumienia magnetycznego jest **maksweł**; jest to taki strumień, który przechodzi przez 1 cm.<sup>2</sup> powierzchni prostopadłej do kierunku linii indukcji przy natężeniu indukcji równym 1 gausowi.

### Z a d a n i e.

Jaki będzie strumień indukcji magnetycznej w żelazie o przekroju 5 cm.  $\times$  2 cm., umieszczonym w polu magnetycznem jednorodnem o indukcji magnetycznej  $B = 15000$  gausów?

$$\Phi = B S = 15000 \cdot 10 = 150000 \text{ makswełów.}$$

**Magnetyczne działanie prądu.** Jak już wspomnieliśmy, nietylko magnes, ale i prąd elektryczny czy to konwekcyjny, czy też przewodzony wytwarza pole magnetyczne. Możemy się o tem najłatwiej przekonać

z doświadczenia Rowlanda. Na osi  $O$  osadzony jest krążek ebonitowy (rys. 75) oklejony po obu stronach listkami stanjolu. Miotelka drucziana  $M$ , połączona ze źródłem elektryczności, dotyka wirującego krążka i zopatrjuje listki przez zetknięcie w ładunki elektryczne; będziemy więc mieli tutaj ruch ładunków elektrycznych przenoszonych czyli prąd konwekcyjny. W pobliżu krążka zawieszamy igłę magnetyczną  $NS$ , zabezpieczoną starannie od elektrostatycznego działania ładunków. Z chwilą gdy krążek zacznie wirować, igła odchyli się w tę lub inną stronę, zależnie od kierunku wirowania i znaku ładunków elektrycznych. Wielkość odchylenia jest w stosunku prostym do wielkości ładunków unoszonych przez krążek i do szybkości wirowania. Odchylenie zachowa ten sam kierunek przy jednoczesnej zmianie znaku ładunków i kierunku obrotu krążka. To samo zjawisko otrzymamy i przy prądach przewodzonych: igła magnetyczna umieszczona w pobliżu przewodnika z prądem (rys. 76) będzie się odchylała w tę lub inną stronę, zależnie od kierunku prądu w tym przewodniku. Ponieważ w prądach przewodzonych ładunki elektryczne i ich szybkość są większe niż w prądach konwekcyjnych, działanie ich na igłę magnetyczną będzie bardziej energiczne.

Według prawa Ampera, pod wpływem pola magnetycznego wytworzonego przez przewodnik z prądem, kierunek odchylenia igły będzie taki, że człowiek płynący po przewodniku w kierunku prądu i zwrócony twarzą ku igle magnetycznej zobaczy jej biegun północny odchylający się w lewo (rys. 76).

**Pole magnetyczne przewodników z prądem.** Prześniemy długi drut, po którym przepływa prąd elektryczny, przez papier posypany opiłkami żelaznymi (rys. 77); po potrząśnięciu zobaczymy, że opiłki ułożą się dokoła drutu według kół spółśrodkowych. Tak

ułożone opiłki dają obraz linii sił pola wytworzonego przez prąd przepływający po długim prostoliniowym przewodniku. Umieszczony w takim polu swobodny biegun dodatni magnetyczny otrzymałby ruch po jednym z tych kół w takim kierunku, który dla patrzącego w kierunku prądu okazałby się zgodnym z ruchem wskazówki zegara.

O ile powyższy przewodnik zegnjemy kołowo, to utworzy się jakby pęk linii wychodzących z płaszczyzny rysunku ku widzowi (rys. 78a) i zamykających się z odwrotnej strony. Tak zgięty przewodnik pod prądem wytwarza pole analogiczne do pola wytwarzanego przez cienką, odpowiadającą mu kształtem, blaszkę namagnesowaną (rys. 78b), gdzie linie sił, wychodzące z bieguna północnego, okrążają brzegi blaszki i wchodzi do bieguna południowego. Podobieństwo wytwarzanych pól w wypadku kołowego zgięcia przewodnika i okrągłej blaszki namagnesowanej nie jest przywilejem ich kształtu kołowego. Podobieństwo to będzie istniało dla każdej figury płaskiej, utworzonej z przewodnika i uwarunkowane jest jedynie odpowiedniością kształtu blaszki i przewodnika.

Dalsze podobieństwo między obwodami elektrycznymi i płaskimi blaszkami magnetycznymi przejawia się w oddziaływaniu na nie magnesów.

O ile przewodnik po którym przepływa prąd, zawiesimy tak, aby mógł się swobodnie obracać i umieścimy pod nim magnes, to przewodnik ustawi się w płaszczyźnie prostopadłej do osi magnesu w taki sposób, że dla patrzącego od strony bieguna południowego obieg prądu będzie odbywał się w kierunku ruchu wskazówki zegara (rys. 79).

Zupełnie analogicznie zachowałaby się cienka namagnesowana blaszka, ustawiając się biegunem północnym w kierunku bieguna południowego magnesu.

Tak samo pod wpływem magnetyzmu ziemskiego, przy dostatecznie silnym prądzie i małym tarcu w punktach zawieszenia, przewodnik ustawi się w płaszczyźnie prostopadłej do południka magnetycznego, a kierunek prądu w nim będzie dla patrzącego z północy przeciwny obiegowi wskazówki zegara.

Dwa obwody elektryczne oddziałują na siebie w taki sam sposób, jakby oddziaływały odpowiednio dobrane blaszki magnetyczne, a więc gdy płaszczyzny ich obwodów są równoległe i kierunki prądów zgodne, obwody te przyciągają się (rys. 80a), gdy kierunki prądów są przeciwne — odpychają się (rys. 80b). O ile płaszczyzny obwodów nie są równoległe, a jeden z przewodników może się obracać, to będzie on starał ustawić się tak, by płaszczyzna jego obwodu była równoległa do płaszczyzny drugiego przewodnika i kierunki prądów były w nich zgodne. Tak samo blaszka magnetyczna ruchoma umieszczona w pobliżu drugiej nieruchomej obróciłaby się tak, by płaszczyzny ich były równoległe, a bieguny różnoimienne zwrócone ku sobie.

(Na rysunku przez plus oznaczone są prądy w kierunku za płaszczyznę rysunku, przez minus — od płaszczyzny rysunku w kierunku patrzącego).

Te własności obwodów płaskich znalazły zastosowanie w t. zw. solenoidach. Jest to spiralnie zwinięty przewodnik, który można rozpatrywać jako szereg połączonych obwodów płaskich (rys. 81). Z chwilą gdy po nich płynie prąd, tak zwinięty przewodnik powinien zachowywać się jak magnes; tak też jest w istocie: magnetyzm ziemski działa na solenoid, tak jak i na magnes. Solenoid z prądem, zawieszony swobodnie (rys. 82), ustawia się w płaszczyźnie południka magnetycznego. Dwa solenoidy działają na siebie jak dwa magnesy. Solenoid posiada więc jak i magnes

bieguny magnetyczne, które określa nam reguła prawej ręki, mianowicie: „gdy położymy na solenoidzie prawą rękę tak, aby kierunek palców zgadzał się z kierunkiem prądu, wówczas odchylony wielki palec wskaże biegun północny” (rys. 83). Bieguny te umieszczone są na jego końcach, a więc inaczej niż w magnesie, gdzie są one odalone nieco od końców. Solenoid nie posiada również linii neutralnej. Ponieważ każdy zwoj solenoidu wytwarza dokoła siebie pole magnetyczne jak oddzielny przewodnik kołowy, więc wszystkie zwoje wytwarzają jedno wspólne pole zbliżone do pola magnesu.

Linje sił solenoidu są zamknięte (rys. 83), wychodząc z północnego końca solenoidu i przechodząc przez jego wnętrze, wracają do swych początków. Wewnątrz więc solenoidu pole będzie bardzo silne, gdyż skupiają się tam wszystkie linje sił. Ze względu na to, że linje te nie przecinają się, a więc wewnątrz solenoidu muszą biec prawie równoległe, pole wewnątrz solenoidu może być uważane za jednostajne.

**Prawo Laplace'a i układ jednostek elektromagnetycznych.** Uczni Biot, Savart i Laplace w rezultacie swych licznych doświadczeń doszli do wniosku, że siła, która działa na umieszczoną w polu magnetycznym prądu masę magnetyczną, może być uważana jako suma sił, z jakimi działają na tę masę bardzo małe elementy danego przewodnika z prądem i że zależność tych sił od natężenia prądu da się wyrazić następującym wzorem:

$$f = k \frac{Jlm}{r^2} \sin \beta; \text{ skąd } h = k \frac{Jl}{r^2} \sin \beta$$

gdzie  $r$  oznacza odległość masy magnetycznej  $m$  od środka odcinka  $l$ ,  $\beta$  — kąt pomiędzy kierunkiem prądu i linią łączącą środek odcinka  $l$  z masą  $m$  (rys. 84).

Siłę działającą na masę  $m$  i natężenie pola oznaczyliśmy małemi literami  $h$  i  $f$  celem zaznaczenia, że wielkości te odnoszą się do bardzo małego elementu przewodnika wytwarzającego pole.

Współczynnik  $k$  we wzorze Laplace'a zależy od wyboru jednostek w jakich wyrażamy poszczególne wielkości tego wzoru. Jeżeli założymy  $k = 1$ ,  $m = 1$  (jednostki masy magnetycznej),  $l = 1$  cm.,  $\sin \beta = 1$

czyli  $\beta = \frac{\pi}{2}$  i  $r = 1$  cm., oraz  $f = 1$  dyna,

to  $J$  z konieczności będzie równe 1.

Nowa ta jednostka, określona przez działanie magnetyczne prądu będzie jednostką układu zwanego **układem elektromagnetycznym jednostek** (*J. E. M.*).

Za jednostkę więc natężenia prądu w układzie *J. E. M.* przyjmujemy natężenie takiego prądu, który płynąc po łuku koła o promieniu 1 cm. ( $r = 1$  cm.,

$\beta = \frac{\pi}{2}$  const.) działa na jednostkę magnetyczną

umieszczoną w jego środku z siłą jednej dyny. Tak określona 1 *J. E. M.* natężenia prądu równa się 10 jednostkom praktycznym:

$$1 \text{ J. E. M.} = 10 \text{ amp.}$$

Określenie jednostki elektromagnetycznej natężenia prądu pociąga za sobą konieczność wyprowadzenia i innych jednostek dla tego układu, któreby spełniały równania, wyprowadzone dla jednostek *J. E. S.* bez konieczności wprowadzania do nich współczynników proporcjonalności, a więc:

**elektromagnetyczna jednostka ilości elektryczności jest określona równaniem:**

$$Q = J t$$



będzie to taka ilość elektryczności, która przepływa przez poprzeczny przekrój przewodnika w ciągu 1 sekundy przy natężeniu prądu w tym przewodniku równym 1 *J. E. M.*,

**elektromagnetyczna jednostka różnicy potencjałów** musi spełniać równanie:

$$V = \frac{P}{Q}, \text{ gdzie } P = 1 \text{ erg}$$

będzie to więc taka różnica potencjałów, przy której na przeniesienie elektromagnetycznej jednostki ilości elektryczności pomiędzy punktami o tej właśnie różnicy potencjałów wykonana zostanie praca 1 *erga*;

**elektromagnetyczna jednostka oporu elektrycznego** jest określona ze wzoru:

$$R = \frac{V}{J}$$

jest to oporność takiego przewodnika, po którym przepływa prąd o natężeniu równem elektromagnetycznej jednostce natężenia prądu, przy różnicy potencjałów na jego końcach równej elektromagnetycznej jednostce potencjału elektrycznego;

**elektromagnetyczna jednostka pojemności elektrycznej** jest określona ze wzoru:

$$C = \frac{Q}{V}$$

(jako pojemność takiego przewodnika, któremu elektromagnetyczna jednostka ilości elektryczności nadaje potencjał równy jednostce elektromagnetycznej.

Niżej podana tabela ilustruje nam wymiar wielkości elektrycznych, ich jednostki praktyczne i absolutne w układzie *J. E. S.* i *J. E. M.*

WIELKOŚCI ELEKTRYCZNE	Zależność wielkości elektrycz- nych pomię- dzy sobą	Wymiar wielkości elektrycznych w układzie		Jednostki praktyczne i ich zależność od jednostek absolutnych
		J.E.S.	J.E.M.	
Natężenie prądu . . .	$J = \frac{F r^2}{m l}$	$L^{1/2} M^{1/2} T^{-2}$	$L^{1/2} M^{1/2} T^{-1}$	1 amp = = $3 \cdot 10^9$ J.E.S.  1 amp. = = $10^{-1}$ J.E.M.
Pość elektryczności	$Q = J t$	$L^{1/2} M^{1/2} T^{-1}$	$L^{1/2} M^{1/2} T^1$	1 kul = = $3 \cdot 10^9$ J.E.S.  1 kul = = $10^{-1}$ J.E.M.
Różnica potencja- łów lub siła elek- tromotoryczna . . .	$V = \frac{P}{Q}$	$L^{1/2} M^{1/2} T^{-1}$	$L^{1/2} M^{1/2} T^{-2}$	1 volt = = $\frac{1}{300}$ J.E.S.  1 volt = = $10^8$ J.E.M.
Opór elektryczny . . .	$R = \frac{V}{J}$	$L^{-1} T^1$	$L^2 T^{-1}$	1 om = = $\frac{1}{9} 10^{-11}$ J.E.S.  1 om = = $10^9$ J.E.M.
Pojemność elektry- czna . . . . .	$C = \frac{Q}{V}$	$L^1$	$L^{-1} T^2$	1 farad = = $9 \cdot 10^{11}$ J.E.S.  1 farad = = $10^{-9}$ J.E.M.
Spółczynnik samo- indukcji . . . . .	$L = \frac{E \delta l}{J}$	$L^{-1} T^2$	$L^1$	—  1 henry = = $10^9$ J.E.M.

W tabeli tej, celem ujęcia wszystkich jednostek elektrycznych, umieszczona została również jednostka nowej wielkości elektrycznej, z którą następnie zapoznamy się, a która nazywa się **spółczynnikiem samoindukcji**.

**Natężenie pola magnetycznego przewodników z prądem.** Weźmy przewodnik kołowy (rys. 85), po którym przepływa prąd o natężeniu  $J$  jednostek elektromagnetycznych. Według prawa Laplace'a każdy element  $l_i$  działa na umieszczoną w punkcie  $O$  masę magnetyczną  $m$  z siłą:

$$f_i = \frac{J l_i m}{r^2} \sin \beta = \frac{J l_i m}{r^2}$$

kąt  $\beta$  będzie to kąt pomiędzy promieniem  $r$  i styczną do obwodu w punkcie przecięcia się tego promienia z obwodem czyli  $\beta = 90^\circ$ ,  $\sin \beta = 1$ .

Działanie całego obwodu:

$$F = f_1 + f_2 + \dots + f_n + \dots$$

$$F = \frac{Jm}{r^2} (l_1 + l_2 + l_3 + \dots) = \frac{Jm}{r^2} \cdot 2\pi r = \frac{2\pi Jm}{r}$$

Stąd natężenie pola w punkcie  $O$ :

$$H = \frac{2\pi J}{r} \text{ gausów}$$

gdy  $J$  będzie wyrażone w amperach, to

$$H = \frac{2\pi J}{10r} = 0,2\pi \frac{J}{r} \text{ gausów.}$$

Dla długiego prostoliniowego przewodnika siła, jaka działa w jego polu magnetycznym na masę magne-

tyczną  $m$  w odległości  $r$  od przewodnika, będzie również równa sumie działań poszczególnych elementów. Zapomocą rachunku całkowego znajdujemy tę sumę, będzie ona dla  $J$  wyrażonego w jednostkach *E.M.*:

$$F = \frac{2 J m}{r}; \text{ stąd } H = \frac{2 J}{r}$$

dla  $J$  wyrażonego w amperach:

$$F = \frac{2 J m}{10 r}; \quad H = \frac{2 J}{10 r} = 0,2 \frac{J}{r}$$

Natężenie pola wewnątrz solenoidu zależne jest od ilości zwojów, przypadających na 1 cm. długości linjowej selenoidu i wyraża się:

$$H = 4 \pi \frac{ZJ}{l}$$

gdzie  $Z$  — ilość zwojów solenoidu,  $l$  — jego długość w cm.,  $J$  — natężenie w *J.E.M.*; gdy  $J$  wyrażone jest w amperach:

$$H = \frac{4 \pi}{10} \frac{ZJ}{l} = 1,25 \frac{Z}{l} J$$

Iloczyn  $ZJ$  natężenia prądu wyrażonego w amperach przez ilość zwojów solenoidu nazywamy **amperozwojami**. Oznaczając  $\frac{Z}{l} = z$  otrzymamy wielkość natę-

żenia pola magnetycznego wewnątrz solenoidu

$$H = 1,25 zJ.$$

gdzie  $z$  będzie ilością amperozwojów na 1 cm. długości solenoidu. Jeżeli wewnątrz solenoidu wstawimy rdzeń z żelaza o tym samym poprzecznym przekroju,

co wewnętrzny przekrój solenoidu, to strumień indukcji magnetycznej  $\Phi$  określimy z następującego wzoru:

$$\Phi = B_s = \mu H_s = \frac{1,25 \mu_s ZJ}{l} = \frac{1,25 ZJ}{\frac{l}{\mu_s}}$$

Ostatni wzór przedstawia szczególne podobieństwo do wzoru prawa *Ohma* dla obwodu elektrycznego i dlatego też nosi nazwę prawa *Ohma* dla obwodu magnetycznego.

Iloczyn  $1,25 ZJ$  nazywamy siłą magnetomotoryczną i oznaczamy literą  $F$ , iloraz  $\frac{l}{\mu_s}$  — opornością magne-

tyczną obwodu i oznaczamy literą  $R$ . Strumień indukcji magnetycznej odpowiada natężeniu prądu w obwodzie.

Jak widzimy, siła magnetomotoryczna jest wprost proporcjonalna do ilości amperozwojów solenoidu. Możemy porównać ze sobą prawo *Ohma* dla obwodu elektrycznego i magnetycznego w sposób niżej podany:

### Tabela porównawcza.

Obwód elektryczny	Obwód magnetyczny
1) $J = \frac{E}{R}$	1) $\Phi = \frac{1,25 ZJ}{\frac{l}{\mu_s}} = \frac{F}{R}$
2) siła elektromotoryczna $E$	2) siła magnetomotoryczna $F = 1,25 ZJ$
3) natężenie prądu w obwodzie $J$	3) strumień indukcji magnetycznej $\Phi$

4) oporność magnetyczna

$$R = \frac{l}{\mu s}$$

4) Oporność elektryczna

$$R = \frac{l}{\gamma s}$$

5) Przenikliwość magnetyczna  $\mu$

5) Przewodnictwo elektryczne  $\gamma$

**Działanie pola magnetycznego na przewodnik z prądem.** Na magnes umieszczony w polu elektromagnetycznym działają siły tego pola. Ze swej strony magnes oddziałuje na przewodnik z prądem. W myśl 3-go prawa Newtona, działania te będą równe co do wielkości i odwrotnie skierowane. Działanie bardzo małego elementu prądu na magnes wyrazi się:

$$f = \frac{mJl}{r^2} \sin \beta$$

Natężenie pola wytworzonego przez masę magnetyczną w odległości równej odległości przewodnika od bieguna magnetycznego:

$$H = \frac{m}{\mu r^2} ; \quad \frac{m}{r^2} = \mu H$$

podstawiając tę wartość we wzór na  $f$ , otrzymamy:

$$f = \mu HJl \sin \beta = BJl \sin \beta$$

czyli na element obwodu równoległy do linii magnetycznych nie działa żadna siła dynamiczna; na element prostopadły do linii magnetycznych działa siła:

$$f = BJl$$

Kierunek oddziaływania na przewodnik z prądem masy magnetycznej  $m$  będzie przeciwny co do kierunku działania przewodnika z prądem na masę magnetyczną,

określonymu w prawie Ampera (w prawie pływaka). Wygodniej jest jednak określać kierunek siły działania masy magnetycznej na przewodnik z prądem z prawa Fleminga lewej ręki, które opiewa: jeżeli trzy palce lewej ręki wielki, wskazujący i średni (rys. 86), postawimy do siebie prostopadle w ten sposób, że palec wskazujący będzie ustawiony w kierunku linii sił pola magnetycznego, a średni będzie wskazywał kierunek prądu w przewodniku, to palec wielki wskaże kierunek siły Laplace'a działającej na przewodnik z prądem.

Jeszcze prostszą wskazówkę pamięciową dla określenia kierunku tej siły daje nam skrócone prawo Ampera, zwane prawem lewej dłoni, które ma następujące brzmienie: jeżeli ustawimy lewą dłoń z prostopadle odchylonym wielkim palcem w ten sposób, aby linie sił pola magnetycznego wytworzonego przez magnes wchodziły prostopadle do dłoni i przesywały ją z wewnątrz nazewnątrz, a złożone palce wskazywały kierunek prądu, to wielki palec wskaże kierunek siły Laplace'a działającej na przewodnik z prądem (rys. 87).

Oddziaływanie magnesu na przewodnik z prądem przedstawia obrazowo przyrząd pokazany na rys. 88. Przyrząd ten składa się z ramki  $a b c$ , opartej w punkcie  $b$  na drążku  $b d$  mającej końce zanurzone w drewnianej rynience  $f$  napełnionej rtęcią. Obok ramki jest umocowany magnes stały  $NS$ . Ramka  $a b c$  jest połączona z zaciskami  $e h$  przyczem z zaciskiem  $e$  przez drążek  $b d$ , z zaciskiem  $h$  — przez rtęć i drążek  $g$ , połączony z rtęcią zapomocą drucika, przechodzącego w dnie drewnianej rynienki  $f$ . Jeżeli załączymy do zacisków  $e h$ , źródło prądu, to zauważymy, że ramka będzie się obracać dokoła osi  $bd$ . Przyczyną tego jest działanie na ramkę magnesu  $NS$ . Wielkość siły działania magnesu podaje prawo Laplace'a, a kierunek — prawo Fleminga lewej ręki lub skrócone

prawo Ampera lewej dłoni. Jeżeli zmienimy kierunek prądu w ramce, to zauważymy, że ramka będzie się obracać w przeciwnym kierunku.

**Praca w polu elektromagnetycznym.** Przewodnik prostoliniowy z prądem wywołuje pole, w którym linie sił są kołami o środkach leżących na osi przewodnika. O ile umieszczoną w takim polu masę magnetyczną, poprowadzimy dokoła przewodnika, to zostanie wykonana pewna praca ujemna lub dodatnia, zależnie od kierunku ruchu tej masy. W każdym punkcie toru na masę magnetyczną działa siła:

$$F = \frac{2J}{r}$$

ponieważ droga masy:  $l = 2\pi r$

a więc praca:  $A = Fl = 4\pi J$

jeżeli teraz masę  $m$  poprowadzimy inną drogą, np. jak na rys. 89, to praca w jednej części drogi będzie dodatnia, w drugiej ujemna, a praca całkowita będzie równa zeru. Widzimy więc, że praca na drodze zamkniętej będzie jedynie różna od zera, gdy droga ta okrąży przewodnik z prądem.

**Praca przy przesunięciu przewodnika w polu magnetycznym.** (rys. 90a). Jeżeli element  $l$  przewodnika z prądem, tworzący kąt  $\varphi$  z kierunkiem pola, przesuniemy równolegle w kierunku tworzącym kąt  $\alpha$  z kierunkiem siły nań działającej, (siła działa prostopadle do kierunku pola i do przewodnika) po drodze  $l_1$ , to praca wykonana będzie się równała:

$$A = Fl_1 \cos \alpha = BJl \cos \varphi l_1 \cos \alpha$$



iloczyn  $l_1 l \cos \alpha$  będzie równy powierzchni  $abb'a'$ , jaką utworzy ślad przesuwanego elementu czyli:

$$A = BJs \cos \varphi$$

Kąt  $\varphi$  będzie to kąt, jaki tworzy ta powierzchnia z kierunkiem  $B$  czyli:

$$A = \Phi J$$

gdzie  $\Phi$  strumień magnetyczny, który przetnie element poruszający się czyli różnica pomiędzy  $\Phi_0$  w położeniu początkowym i  $\Phi_1$  w położeniu końcowym.

Jeżeli teraz umieścimy w polu magnetycznym elementarny t. j. bardzo mały obwód elektryczny, po którym przepływa prąd o natężeniu  $J$ , prostopadle do linii sił pola i obrócimy go o kąt  $90^\circ$ , to poszczególne elementy tego obwodu będą przecinać linje magnetyczne, a więc zostanie wykonana pewna praca. W otoczeniu obwodu, jako bardzo małego, możemy uważać pole za jednostajne (rys. 90b).

Jeżeli więc obwód przeszedł z położenia I do położenia II, to żadna linja magnetyczna nie będzie w tem położeniu przecinać płaszczyzny jego obwodu czyli obwód przeciął cały strumień, który początkowo przezeń przechodził, praca więc będzie:

$$A = \Phi J = BJs$$

gdzie  $s$  pole obwodu.

Widzieliśmy, że praca przy obrocie w polu magnetycznym magnesu elementarnego równała się:

$$A_1 = Hlm$$

gdy magnes będzie odpowiednio dobrany, to  $A$  równa się  $A_1$ :

$$Hlm = BJs$$

$$Hlm = \mu HsJ; \quad lm = \mu sJ$$

Widzimy więc, że rolę, jaką odgrywał moment w magnesie, w wypadku obwodu elektrycznego odgrywa iloczyn  $\mu \cdot s \cdot J$ .

**Elektromagnes.** Jeżeli wewnątrz solenoidu z prądem umieścimy rdzeń z miękkiego żelaza, to działanie magnetyczne tego solenoidu o wiele się wzmacni. Taki solenoid z rdzeniem żelaznym nazywamy elektromagnesem. Końce rdzenia są niekiedy zaopatrzone w nasady biegunowe.

Jeżeli rdzeń weźmiemy w kształcie walca, to linje sił pola magnetycznego elektromagnesu przechodzą tylko nieznaczną część swej drogi w rdzeniu, większą część drogi przechodzą w powietrzu od bieguna  $N$  do bieguna  $S$  (rys. 91). O ile rdzeń jest w kształcie podkowy, to linje sił pola magnetycznego przechodzą większą część swej drogi w rdzeniu, mniejszą część w powietrzu (rys. 92).

Część  $AB$  łączącą dwa ramiona podkowiastego, rdzenia, obwinięte przewodnikiem, nazywamy jarzmem.

Jeżeli do bieguna podkowiastego elektromagnesu zbliżymy sztabkę  $CD$  z materiału podlegającego namagnesowaniu, to linje sił z bieguna północnego skierują się przez sztabkę do bieguna południowego. Dzięki temu sztabka  $CD$  stanie się magnesem o biegunach  $N'S'$  i będzie przyciągana przez bieguny  $NS$  elektromagnesu. Sztabka taka w obwodzie magnetycznym odgrywa rolę analogiczną do przewodnika zwierającego bieguny ogniwa w obwodzie elektrycznym i nosi nazwę zwory lub kotwicy.

Uzwojenia muszą być tak nawinięte, żeby według reguły prawej ręki otrzymać na końcach elektromagnesu odmiennie bieguny. Nieprawidłowe nawinięcie powoduje powstawanie na końcach elektromagnesu jednoimiennych biegunów. Otrzymamy wówczas dwa

oddzielne elektromagnesy zwrócone do siebie biegunami jednoimiennymi, wobec czego linje sił ich nie będą się zamykać przez jarzmo i zworę, lecz w każdym elektromagnesie będą przechodzić od północnego do południowego bieguna przez powietrze.

Jeżeli zamiast rdzenia z miękkiego żelaza, weźmiemy rdzeń ze stali, to po wyjęciu go z solenoidu z prądem nie zatraci on swych własności magnetycznych, tak jak rdzeń żelazny, lecz pozostanie magnesem. Dlatego też sztuczne magnesy wyrabiają ze stali przetrzymywanej przez pewien czas w środku solenoidu o dużej ilości amperozwojów na 1 cm. długo.

W elektromagnesach t. zw. spolaryzowanych rdzeń jest magnesem stałym. Prąd, przepływając przez uzwojenia w jednym kierunku, zwiększa jego działanie, w przeciwnym — osłabia. Elektromagnesy spolaryzowane mają zastosowanie przy słabych prądach zmiennych, a więc w słuchawce telefonicznej, w spolaryzowanych dzwonekach sygnałowych, aparatach telefonicznych induktorowych, w stukaczach telegraficznych i t. p.

**Histeresa.** Jeżeli będziemy przepuszczali prąd po uzwojeniu elektromagnesu, to zauważymy, że rdzeń elektromagnesu będzie się nagrzewał, przytem żelazny rdzeń mniej, stalowy więcej. Wytworzone w rdzeniu ciepło jest rezultatem zużytej energii elektrycznej przy przemagnesowywaniu rdzenia z każdą zmianą kierunku prądu w uzwojeniach elektromagnesu. Zjawisko to nosi nazwę „histeresy”.

Celem zbadania tego zjawiska rozpatrzmy układ przedstawiony na rys. 93. Rdzeń *BC* z materiału magnetycznego znajduje się wewnątrz solenoidu, po którym płynie prąd z baterji ogniw *E*. Natężenie i kierunek prądu w solenoidzie możemy zmieniać zapo-

mocą opornika  $R$  i przełącznika  $D$ . Na przedłużeniu osi rdzenia ustawiamy busołą w ten sposób, żeby igła magnetyczna, znajdująca się w położeniu zerowym t. j. w płaszczyźnie południka magnetycznego, była prostopadła do osi rdzenia. Przepuszczając prąd po solenoidzie, będziemy obserwowali odchylenie igły magnetycznej wskutek namagnesowania się rdzenia  $BC$ . Zwiększając lub zmniejszając natężenie prądu w solenoidzie, będziemy obserwowali większe lub mniejsze odchylenie igły magnetycznej od położenia zerowego.

O ile na osiach spółrzędnych będziemy w odpowiedniej skali odkładali: na osi odciętych wielkości natężenia prądu, na osi rzędnych wielkości odchylenia igły magnetycznej od położenia zerowego, odczytane na skali busoli, to otrzymamy krzywą przedstawioną na rys. 94, zwaną pętlą histerezy przedstawiającą graficznie zależność pomiędzy natężeniem prądu i wielkością odchylenia igły. Ponieważ wielkość natężenia prądu w solenoidzie jest proporcjonalna do wielkości natężenia pola magnesującego  $H$  wytworzonego przez ten prąd wewnątrz solenoidu, a wielkość odchylenia igły magnetycznej busoli jest proporcjonalna do wielkości indukcji magnetycznej  $B$  wewnątrz rdzenia  $BC$  czyli do wielkości masy magnetycznej w biegunie namagnesowanego rdzenia, to krzywa ta będzie również graficznym wykresem funkcji, której zmienną niezależną (przyczyną) jest natężenie pola magnesującego  $H$ , a zmienną zależną (skutek) jest indukcja magnetyczna  $B$ , względnie masa magnetyczna  $m$ .

Rozpatrzmy obecnie szczegółowo budowę samej krzywej. Jeżeli będziemy przepuszczali prąd po solenoidzie, zwiększając stopniowo jego natężenie, to zauważymy, że odpowiednie wielkości odchylenia igły magnetycznej wzrastają prawie proporcjonalnie do wzrostu wielkości natężenia prądu. Wreszcie przy pewnej wielkości natężenia prądu, równej  $OA$ , otrzy-

mamy pewne odchylenie igły odpowiadające  $AD$ , i nie zwiększające się ze wzrostem natężenia prądu.

Punkt  $D$  odpowiada magnetycznemu nasyceniu rdzenia, przy którym dalsze zwiększanie natężenia prądu w solenoidzie czyli dalsze namagnesowywanie rdzenia staje się bezcelowem.

Gdy teraz zaczniemy zmniejszać natężenie prądu, to odchylenie igły magnetycznej będzie się zmniejszać, lecz z pewnem opóźnieniem w stosunku do natężenia prądu. W chwili, gdy natężenie prądu będzie zero, igła magnetyczna wskaże jednak pewne odchylenie odpowiadające  $OE$ , co dowodzi, że rdzeń posiada własności magnetyczne, chociaż pole magnesujące już nie istnieje. Wielkość indukcji magnetycznej  $B$  rdzenia jest opóźniona względem natężenia pola magnesującego  $H$  wewnątrz solenoidu. Rdzeń posiada pozostałość magnetyczną lub t. zw. magnetyzm szczątkowy (remanent).

Jeżeli teraz zapomocą przełącznika  $D$  zmienimy kierunek prądu w solenoidzie i będziemy odpowiednie wielkości natężenia prądu odkładać po lewej stronie osi odciętych, to zauważymy, że dla doprowadzenia igły magnetycznej do położenia zerowego, t. j. dla zupełnego usunięcia z rdzenia magnetyzmu szczątkowego, będziemy musieli natężenie prądu doprowadzić do wielkości odpowiadającej  $OP$ . Wielkość natężenia pola rozmagnesowującego  $H$ , odpowiadającą  $OP$ , a potrzebną do zniszczenia magnetyzmu szczątkowego rdzenia nazywamy **koercją**.

Przy dalszem zwiększaniu natężenia prądu igła magnetyczna zmieni kierunek odchylenia, wobec czego będziemy odpowiednie wielkości tego odchylenia odkładać na osi rzędnych w dół. Przy pewnej wielkości natężenia  $OA$ , dojdziemy do magnetycznego nasycenia rdzenia (punkt  $D_1$ ).

Przy zmniejszaniu natężenia prądu znowu otrzymamy pozostałość magnetyczną  $OE_1$  i koercję  $OP_1$ , a następnie wrócimy do punktu nasycenia magnetycznego  $D$ . W ten sposób otrzymamy zamkniętą krzywą  $DPD_1E_1P_1D$ , zwaną pętlicą histerezy lub cyklem histerezy. Krzywą  $OD$  nazywamy krzywą dziewiczości.

Powierzchnia objęta pętlicą histerezy będzie dla stali większa, dla miękkiego żelaza mniejsza. Powierzchnia ta jest proporcjonalna do ilości energii zużytej na usunięcie z rdzenia magnetyzmu szczątkowego w jednym cyklu. Zjawisko histerezy będziemy mieli nie tylko w wypadku nieruchomego rdzenia i zmiennego natężenia pola magnesującego wewnątrz solenoidu z prądem, lecz i w wypadku wirowania sztabki  $AB$  lub pierścienia z materiału magnetycznego (rys. 95) w stałym polu magnetycznym dokoła osi  $O$ . Przy tem wirowaniu sztabka  $AB$  i część  $AB$  pierścienia w ciągu jednego obrotu przemagnesowują się dwukrotnie, t. j. wykonują całą pętlicę histerezy, gdyż linje sił w jednym położeniu sztabki  $AB$  lub części pierścienia  $AB$  wchodzą do  $A$  i wychodzą przez  $B$ , natomiast w innym położeniu wchodzą przez  $B$  i wychodzą przez  $A$ .

Stratę energii na histerezę w wypadku rozpatrzonym na rys. 93 ponosi źródło prądu, w wypadku rozpatrzonym na rys. 95 maszyna obracająca sztabkę lub pierścień w polu magnetycznym. Celem zmniejszenia strat na histerezę musimy rdzeń wyrabiać z miękkiego żelaza, mającego małą powierzchnię pętlicy histerezy, możliwie zmniejszać objętość masy rdzenia, oraz zmniejszyć ilość razy przemagnesowania, którym podlega rdzeń, przez zmniejszenie ilości zmian prądu w uzwojeniach magnesujących (w wypadku, jak na rys. 93), lub też przez zmniejszenie ilości obrotów rdzenia w polu magnetycznym (w wypadku, jak na rys. 95).

**Siła przyciągania elektromagnesu.** Kotwica z miękkiego żelaza, zawieszona na haku wagi sprężynowej, zbliżona do elektromagnesu staje się magnesem (rys. 96) o biegunach znaków przeciwnych, niż przylegające do jej końców bieguny elektromagnesu. Będzie więc ona przyciągana przez bieguny elektromagnesu, wskutek czego sprężyna wagi rozciągnie się i na skali wagi będziemy mogli odczytać wielkość siły przyciągania. Gdy kotwica zetknie się z elektromagnesem, strumień magnetyczny będzie zamknięty wewnątrz żelaza, czyli na zewnątrz nie wyjdzie ani jedna linja sił tego strumienia i igła magnetyczna, zbliżona do biegunów elektromagnesu (do miejsca styku kotwicy z biegunami), nie wskaże żadnego odchylenia. Taki obwód magnetyczny zamknięty w żelazie nie posiada biegunów.

Ponieważ elektromagnes przyciąga kotwicę, więc wniosek z tego, że posiada on pewien zasób energii. Wielkość siły przyciągania elektromagnesu będzie równa różnicy wskazań wagi sprężynowej przed zamknięciem obwodu prądu w uzwojeniach elektromagnesu i po zamknięciu.

Zwiększając stopniowo natężenie prądu w uzwojeniach elektromagnesu, możemy zapomocą wagi sprężynowej każdorazowo zmierzyć odpowiednią siłę, z jaką elektromagnes przyciąga kotwicę. W ten sposób stwierdzono, że wielkość siły przyciągania zależy od wielkości indukcji magnetycznej  $B$  w żelazie, t. j. od stopnia namagnesowania żelaza przez indukcję, oraz od całkowitej powierzchni styku pomiędzy biegunami elektromagnesu i kotwicą. Wielkość siły przyciągania elektromagnesu wyrażamy następującym wzorem:

$$F = \frac{B^2 S}{8\pi} \text{ dyn} = \frac{1}{981000} \cdot \frac{B^2 S}{8\pi} \text{ kg}$$

gdzie  $B$  — wyrażone w gausach,  $s$  — w  $\text{cm}^2$ ,

Jeżeli ilość zwojów uzwojenia elektromagnesu będzie  $z$ , natężenie prądu przepływającego przez uzwojenia —  $J$ , średnia długość obwodu magnetycznego —  $l$ , to wielkość siły przyciągania elektromagnesu możemy wyrazić w następujący sposób:

$$B = 1,25 \frac{zJ}{l} \mu,$$

$$F = \frac{1}{981000} \frac{1,25^2 z^2 \mu^2}{8 \pi l^2} \cdot S \text{ kg.}$$

Jak widzimy z tego wzoru, elektromagnesy używane do podnoszenia ciężarów powinny mieć jaknajwiększy poprzeczny przekrój rdzenia, jaknajwiększą ilość amperozwojów i jaknajmniejszą długość obwodu magnetycznego. Wielkość indukcji magnetycznej  $B$  waha się w granicach od 15000 do 18000 gausów.

Elektromagnesy używane w fabrykach do przenoszenia dużych brył z materiału magnetycznego działają w następujący sposób: z chwilą przybliżenia elektromagnesu do bryły zamykamy prąd w uzwojeniach, poczem elektromagnes wraz z bryłami jest podejmowany pionowo i przesuwany poziomo według potrzeby. Z chwilą przerwania prądu bryła zostaje uwolniona.

**Dzwonki elektryczne.** Na zasadzie przyciągania kotwicy przez bieguny elektromagnesów zbudowane są dzwonki elektryczne. Rozróżniamy dwa rodzaje dzwoneków: dzwonek prądu stałego, gdzie rdzeń elektromagnesu jest z miękkiego żelaza i dzwonek prądu zmiennego, gdzie rdzeń elektromagnesu jest magnesem stałym czyli spolaryzowanym. Dzwonek w tym wypadku nazywamy spolaryzowanym. Rozpatrzmy obecnie oba te rodzaje dzwoneków.

Dzwonek prądu stałego (rys. 97) składa się z magnesu  $AB$ , kotwicy  $F$  zakończonej młoteczką  $M$



i sprężyny kontaktowej  $L$  przymocowanej do kotwicy  $F$  i zamykającej obwód przy zetknięciu z śrubką  $D$ . Zapomocą tej śrubki można regulować odległość pomiędzy kotwicą  $F$  i biegunami elektromagnesu  $AB$ . Gdy naciśniemy przycisk dzwonkowy  $K$ , to prąd z dodatniego bieguna baterji ogni w  $E$  przejdzie przez zacisk dzwonka po uzwojeniach elektromagnesu, przez sprężynę  $L$ , śrubkę regulującą  $D$ , przycisk dzwonkowy  $K$ , do ujemnego bieguna baterji  $E$ .

Namagnesowany rdzeń elektromagnesu przyciągnie kotwicę  $F$  i młoteczek  $M$  uderzy o szalkę  $T$ . W ten sposób jednak pomiędzy sprężyną kontaktową  $L$  i śrubką regulującą  $D$  obwód zostanie przerwany. Dzięki temu rdzeń elektromagnesu wykonany z miękkiego żelaza przestanie przyciągać kotwicę  $F$  i ta pod wpływem sprężyny  $L$  odskoczy wraz z młoteczką  $M$ . Obwód zostanie ponownie zamknięty i t. d.

Przy naciśnięciu przycisku dzwonkowego w obwodzie dzwonka będzie płynął prąd pulsujący, młoteczek  $M$  będzie rytmicznie uderzał o szalkę  $T$ .

Używany w telefonji i radjotelegrafji przerywacz elektromagnetyczny, zwany inaczej brzęczykiem lub bucukiem (rys. 98), posiada analogiczne urządzenie jak i dzwonek prądu stałego, tylko bez młoteczka i szalki dzwonkowej. Regulująca śrubka kontaktowa  $D$  odgrywa w przerywaczu elektromagnetycznym rolę regulatora tonu, gdyż zapomocą niej zmieniamy częstość przerw obwodu.

Dzwonek prądu zmiennego albo spolaryzowany (rys. 99) składa się z elektromagnesu spolaryzowanego, kotwicy  $F$ , w środku której jest przymocowany pręcik  $D$  zakończony młoteczką  $M$ , uderzającym o szalki dzwonkowe  $T$  przy przechylaniu się kotwicy  $F$ . W tym wypadku elektromagnes składa się z 2-ch magnesów stałych, zwróconych do kotwicy

różnoimiennymi lub jednoimiennymi biegunami (rys. 99a i b). Po uzwojeniach elektromagnesu przepływa prąd zmienny. W zależności od jego kierunku dzia-  
 łanie jednego elektromagnesu będzie wzmacniane, drugiego — osłabiane, przez co kotwica pochyli się w stronę magnesu silniejszego. W wypadku, kiedy magnesy zwrócone są do kotwicy biegunami różno-  
 imiennymi, uzwojenia muszą być nawinięte tak, aby prąd w nich przechodził w jednakowym kierunku (kierunek nawinięcia uzwojeń odwrotny). W wypadku, kiedy magnesy zwrócone są do kotwicy biegunami jednoimiennymi, uzwojenia muszą być nawinięte tak, aby prąd w nich przechodził w różnych kierunkach (kierunek nawinięcia uzwojeń zgodny).

W ostatnich czasach znalazły ogromne zastosowanie przy obróbce metali uchwyty elektromagnetyczne; których konstrukcja w niczem się nie różni od konstrukcji elektromagnesów; posiadają one po kilka rdzeni i odpowiednią do tego ilość cewek magnesujących. Uchwyty takie okazały się daleko lepsze od zwykłych uchwytów w obrabiarkach do metali, gdyż pozwalają na szybkie i dokładne zamocowanie obrabianego przedmiotu.

### Z a d a n i a.

1. Znaleźć natężenie pola magnetycznego w punkcie *A* (rys. 100), znajdującym się na przedłużeniu osi magnesu *NS* w odległości 30 cm. od jego środka, jeżeli magnes ten, długości 10 cm., posiada w każdym biegunie po 1 *J. E. M.* masy magnetycznej.

Natężenie pola magnetycznego w punkcie *A* będzie równe algebraicznej sumie natężeń wywołanych przez obydwa bieguny magnesu:

$$H_m = \frac{m_1}{r_1^2} + \left( - \frac{m_2}{r_2^2} \right) =$$

$$= \frac{15}{25^2} - \frac{15}{35^2} = 0,01176 \text{ gaussa}$$

2. Czemu się równa natężenie pola magnetycznego w odległości 10 mtr. od prostoliniowego przewodnika, po którym płynie prąd o natężeniu 4000 amp.?

$$H_i = \frac{2J}{10r} = \frac{2 \cdot 4000}{10 \cdot 10 \cdot 100} = 0,8 \text{ gausów}$$

3. Jaka jest wielkość natężenia pola magnetycznego wewnątrz solenoidu o dług. 10 cm., posiadającego 1200 zwojów, po którym płynie prąd o natężeniu 0,5 amp.?

Wielkość natężenia pola magnetycznego wewnątrz solenoidu:

$$H_i = 1,25 \cdot \frac{1200 \cdot 0,5}{10} = 75 \text{ gausów.}$$

4. Ile amperozwojów powinien posiadać solenoid bez rdzenia i z rdzeniem o przenikliwości magnetycznej  $\mu = 2000$ , żeby otrzymać natężenie pola wewnątrz solenoidu = 10000 gausów?

a) O ile wewnątrz solenoidu nie będzie rdzenia, to:

$$H_i = 1,25 nJ = 10000, \text{ stąd } nJ = \frac{10000}{1,25} = 8000 \text{ amperozwojów na 1 cm. długości solenoidu.}$$

b) O ile wewnątrz solenoidu jest rdzeń, to dzięki indukcji magnetycznej w rdzeniu, natężenie pola magnetycznego wytworzonego przez ten sam solenoid będzie:

$$H_i = \frac{10000}{2000} = 5 = 1,25 nJ;$$

stąd  $nJ = \frac{5}{1,25} = 4$  amperozwoje na 1 cm. długości solenoidu.

Z ostatniego zadania widzimy, jak wielkie znaczenie ma rdzeń w elektromagnesie dla jego magnetycznych własności. Dla wytworzenia pola magnetycznego o jednakowym natężeniu solenoid bez rdzenia musi posiadać 8000 amperozwojów na 1 cm. swej długości, po wstawieniu rdzenia tylko 4 amperozwoje na 1 cm. dł.

5) Określić wielkość strumienia magnetycznego w elektromagnesie pierścieniowym, którego rdzeń ma 50 cm. średniej długości, przekrój poprzeczny 5 cm.<sup>2</sup> i jest przedzielony w środku warstwą powietrza 5 mm. grubości; przenikliwość magnetyczna rdzenia  $\mu = 2000$ , liczba zwojów  $N = 210$ , natężenie prądu w uzwojeniu  $J = 8$  amperów.

Wielkość strumienia magnetycznego obliczamy z prawa Ohma dla obwodu magnetycznego, musimy przytem uwzględnić opór magnetyczny szczeliny powietrznej i opór magnetyczny rdzenia:

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{1,25 NJ}{\frac{l}{\mu S} + \frac{l'}{S}} = \frac{1,25 \cdot 210 \cdot 8}{\frac{50}{20005} + \frac{0,5}{5}} = \\ &= \frac{2100}{0,105} = 20096 \text{ makswelli.} \end{aligned}$$

6) Jaki największy ciężar można powiesić na haku żelaznej kotwicy, przylegającej do 2-ch rdzeni elektromagnesu, jeżeli przekrój poprzeczny każdego rdzenia wynosi 15 cm.<sup>2</sup>, przyczem  $B = 16000$  gausów? Wagi kotwicy nie przyjmujemy pod uwagę.

Ciężar, który można powiesić na haku kotwicy będzie:

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{981000} \cdot \frac{B^2 S}{8\pi} \text{ kg} = \\ &= \frac{16000^2 \cdot 2 \cdot 15}{981000 \cdot 8 \cdot 3,14} = 311,6 \text{ kg.} \end{aligned}$$

7) Obliczyć ilość amperozwojów i wymiary elektromagnesu i kotwicy (rys. 101), której ciężar wynosi 200 kg., jeżeli przenikliwość magnetyczna rdzenia kotwicy  $\mu = 525$ , wielkość indukcji magnetycznej  $B = 15000$  gausów, wymiary rdzenia elektromagnesu kotwicy są w następującym stosunku:

$$AD = BC = \frac{3}{2} AB; MN = \frac{3}{2} MP;$$

$$AD = 3 MN;$$

natężenie prądu w uzwojeniach elektromagnesu wynosi 1 amper.

Całkowitą powierzchnię styku biegunów elektromagnesu z kotwicą obliczymy ze wzoru:

$$S = \frac{F \cdot 981000 \cdot 8 \pi}{B^2} = \frac{200 \cdot 981000 \cdot 8 \cdot 3,14}{15000^2} =$$

$$= 22 \text{ cm.}^2$$

Wobec tego poprzeczny przekrój rdzenia elektromagnesu i kotwicy będzie:

$$\frac{22}{2} \text{ cm.}^2 = 11 \text{ cm.}^2$$

Ponieważ  $MN = \frac{3}{2} MP$ , możemy napisać następujące równanie:

$$MN^2 = 11 \cdot \frac{3}{2} = 16,5; \text{ skąd } MN = 4,06 \text{ cm.}$$

Teraz możemy znaleźć wymiary stron  $AD$  i  $AB$ :

$$AD = 3 MN = 3 \cdot 4,06 = 12,18 \text{ cm.}$$

$$AB = \frac{2}{3} AD = \frac{2 \cdot 12,18}{3} = 8,12 \text{ cm.}$$

Średnia długość obwodu magnetycznego będzie:

$$2 (AD + AB) = 2 (12,18 + 8,12) = 40,60 \text{ cm.}$$

Całkowity opór obwodu magnetycznego wyniesie:

$$R = \frac{l}{\mu S} \cdot A D = \frac{40,60}{525 \cdot 11}$$

Ilość amperozwojów uzwojenia elektromagnesu, potrzebna dla wywołania indukcji o wielkości  $B = 15000$  gausów obliczymy z następującego równania:

$$\Phi = B S = \frac{1,25 N J}{R}; \text{ stąd } N J =$$

$$\frac{B S R}{1,25} = \frac{15000 \cdot 11 \cdot 40,60}{1,25 \cdot 525 \cdot 11} = 928 \text{ amperozwojów.}$$

Ponieważ natężenie prądu w uzwojeniach elektromagnesu ma wynosić 1 amper, wobec tego ilość zwojów na obu rdzeniach elektromagnesu winna być 928 czyli na każdym rdzeniu 464 zwoje.

8) W polu magnetycznym o natężeniu  $H = 50$  gausów umieszczono przewodnik o długości  $l = 10$  mtr. prostopadle do kierunku pola. Określić siłę pociągową w kg. w wypadku, gdy przez przewodnik płynie prąd o natężeniu  $J = 50$  amperów.

Natężenie prądu musimy wyrazić w jednostkach *J. E. M.* natężenia prądu.

$$J = 50 \text{ amp} = 5 \text{ J. E. M.}$$

Wielkość siły określimy z następującego wzoru:

$$F = \mu H J l \text{ dyn} = 1 \cdot 50000 \cdot 5 \cdot 10000 \text{ dyn} = \\ = \frac{25 \cdot 10^6}{981 \cdot 10^3} = 27,5 \text{ kg.}$$

**Indukcja elektromagnetyczna. Doświadczenia Faraday'a.** W początku XIX wieku Faraday wykonał doświadczenia, rezultat których miał ogromne znacze-

nie dla przemysłu elektrotechnicznego, gdyż dał możliwość konstruowania maszyn, pozwalających otrzymywać prądy o dużej mocy, czego nie można było osiągnąć zapomocą ogniów galwanicznych.

Doświadczenia polegały na tem, że do nieruchomego uzwojenia  $A$ , którego końce połączone były z galwanometrem  $G$ , Faraday wsuwał szybkim ruchem magnes  $NS$  (rys. 102), przyczem stwierdził, że igła galwanometru  $G$  odchyłała się na pewien kąt, który był tem większy im większą szybkość posiadał wprowadzany magnes. Igła galwanometru wskazywała odchylenia tylko w czasie trwania ruchu magnesu, a potem, niezależnie od obecności magnesu wewnątrz cewki, wracała do położenia zerowego. Przy wyjmowaniu magnesu z uzwojenia, igła odchyłała się w przeciwnym kierunku, niż przy wsuwaniu. Kierunek odchylenia igły zależał również od tego, którym biegunem magnes był wsuwany do uzwojenia.

Te same rezultaty otrzymane były, gdy zamiast magnesu stałego użyto solenoidu z prądem stałym (rys. 103). Wielkość odchylenia igły galwanometru w tym wypadku znacznie wzrastała przy wstawieniu do solenoidu żelaznego rdzenia.

Wychylenia igły galwanometru zaobserwowane zostały również i w wypadku, gdy wewnątrz uzwojenia  $A$  umieszczono nieruchomo solenoid  $BC$  i przerywano w nim prąd zapomocą wyłącznika  $K$  (rys. 104) względnie zmieniano jego natężenie zapomocą opornika  $R$ . Przyczem przy zamykaniu obwodu lub przy zwiększaniu natężenia prądu, igła galwanometru odchyłała się w jedną stronę, przy otwieraniu obwodu lub przy zmniejszaniu natężenia prądu — w przeciwną stronę.

Doświadczenia te wykazały, że w uzwojeniu  $A$  powstawały prądy, gdy uzwojenie to było przecinane

przez **zmienny** strumień magnetyczny wytwarzany przez magnes lub solenoid z prądem.

**Wielkość siły elektromotorycznej indukcji.** Niech przewodnik, mający formę płaskiego prostokąta i znajdujący się w jednostajnym polu magnetycznym, może obracać się dokoła osi  $OO$  (rys. 105); gdy połączymy punkty  $a$  i  $b$  z źródłem elektryczności, to po przewodniku tym płynąć będzie prąd elektryczny.

Jeżeli przewodnik umocujemy tak, by nie mógł się obracać, to cała energia prądu przekształci się w energię ciepłą:

$$E J t = J^2 r t$$

a natężenie prądu  $J$  będzie równe:

$$J = \frac{E}{r}$$

Jeżeli teraz przewodnikowi pozwolimy obracać się to wykona on pewną pracę. Na zasadzie prawa zachowania energii, energia dostarczana z zewnątrz musi być równa energii zużytej w tym wypadku na ogrzewanie przewodnika więcej praca wykonana przez przewodnik w danym czasie  $t$ :

$$E J t = J^2 r t + A$$

Praca przewodnika poruszającego się w polu magnetycznym wyrazi się wzorem:

$$A = J (\Phi_o - \Phi_t)$$

gdzie  $\Phi_o - \Phi_t$  ilość linii magnetycznych przeciętych przez elementy przewodnika czyli:

$$E J t = J^2 r t + J (\Phi_o - \Phi_t)$$

$$J = \frac{1}{r} \left( E - \frac{\Phi_o - \Phi_t}{t} \right)$$



Ponieważ opór przewodnika nie zmienił się, więc obecne natężenie prądu będzie mniejsze niż w wypadku przewodnika nieruchomego. Objasniamy to powstaniem siły elektromotorycznej:

$$E_i = \frac{\Phi_0 - \Phi_t}{t}$$

przeciwdziałającej sile elektromotorycznej  $E$  baterji.

Widzimy, że ta nowopowstała siła elektromotoryczna nie zależy od absolutnej wielkości strumienia magnetycznego, a tylko od zmiany na sekundę ilości linii magnetycznych przecinających obwód przewodnika.

Zjawisko powstawania siły elektromotorycznej w poruszającym się w polu magnetycznym przewodniku będzie zachodzić i wtedy, gdy usuniemy źródło prądu, poruszając przewodnik zapomocą energii mechanicznej.

Wzór  $E_i = \frac{\Phi_0 - \Phi_t}{t}$  daje nam pojęcie jedynie

o średniej wielkości siły elektromagnetycznej indukcji w przeciągu czasu  $t$ ; gdybyśmy okres ten zmniejszali, przeszlibyśmy do pojęcia chwili i wielkości siły elektromotorycznej w danej chwili.

Znając oporność przewodnika poruszającego się w polu magnetycznym, możemy z powyższego wzoru określić średnie natężenie prądu, a także średnią ilość elektryczności przepływającej przez obwód, a więc dla  $\Phi$  wyrażonego w makswellach,  $t$  w sekundach,  $r$  — oporu w jednostkach elektromagnetycznych mamy:

$$E = \frac{\Phi_0 - \Phi_t}{t} JEM; \quad J = \frac{E}{r} = \frac{\Phi_0 - \Phi_t}{rt} JEM$$

$$Q = Jt = \frac{\Phi_0 - \Phi_t}{r} JEM$$

Gdy opór wyrazimy w omach, to otrzymamy:

$$E = \frac{\Phi_o - \Phi_t}{t \cdot 10^8} \text{ woltów; } J = \frac{\Phi_o - \Phi_t}{r t \cdot 10^8} \text{ Amp;}$$

$$Q = \frac{\Phi_o - \Phi_t}{r \cdot 10^8} \text{ kul.}$$

Gdyby rozpatrywany przez nas przewodnik kołowy składał się z  $Z$  zwojów, to w każdym z nich powstawałyby siły elektromotoryczne:

$$E_i = \frac{\Phi_o - \Phi_t}{t}$$

równe co do wielkości i zgodne co do kierunku. Uzwojenie takie możemy uważać jako  $Z$  szeregowo połączonych przewodników, a więc siła elektromotoryczna, wywołująca w nich prąd będzie równa sumie algebraicznej sił elektromotorycznych powstających w poszczególnych zwojach, czyli:

$$E = Z \cdot \frac{\Phi_o - \Phi_t}{t} \text{ JEM lub } E = Z \frac{\Phi_o - \Phi_t}{t \cdot 10^8} \text{ woltów}$$

Siłę elektromotoryczną indukcji możemy wyrazić jeszcze w inny sposób (rys. 105). Rozumując jak poprzednio napiszemy, że:

$$E J t = J^2 r t + A$$

Pracę jednak w polu magnetycznym wykonywać będą tylko te części przewodnika które przecinają linie magnetyczne, a więc części przewodnika  $AB$  i  $CD$ . Ponieważ kąt pomiędzy liniami magnetycznymi i kierunkiem prądu w tych częściach przewodnika równa się  $90^\circ$ , więc siła działająca na nie wyrazi się:  $F = J l_p B$ , gdzie w danym wypadku  $B = H$  i przedstawia natężenie pola, a  $l_p$  równa się długości jednej z części pracujących przewodnika.

Jeżeli przewodnik, znajdujący się w położeniu  $I$  (rys. 105), pod wpływem działania sił pola obróci się o bardzo mały kąt  $\alpha$ , to praca wykonana będzie:

$A = 2Fs \cdot \cos \beta = 2Fs \cdot \sin \alpha = 2Jl_p B s \cdot \sin \alpha$ ,  
gdzie  $s \cdot \cos \beta = s \cdot \sin \alpha$  jest to rzut przesunięcia  $s$  na kierunek siły  $F$ ; stąd:

$$EJt = J^2rt + 2Jl_p B s \cdot \sin \alpha$$

$$E = Jr + \frac{2Bl_p s \cdot \sin \alpha}{t}$$

Oznaczając, jak poprzednio, siłę elektromotoryczną indukcji przez  $E_i$  — napiszemy:

$$E_i = \frac{2l_p B s \cdot \sin \alpha}{t}$$

Mnożąc i dzieląc to równanie przez  $a$  otrzymamy:

$$E_i = \frac{2l_p a B \cdot \sin \alpha s}{a t}$$

$2l_p a = S$ , gdzie  $S$  — powierzchnia ograniczona przewodnikiem,  $\frac{s}{t} = v$ , gdzie  $v$  — prędkość linjowa części  $AB$  i  $CD$  przewodnika, czyli:

$$E_i = \frac{BS \sin \alpha v}{a} = BS \cdot \cos \beta \frac{v}{a} = \Phi \omega$$

gdzie  $\Phi$  — strumień magnetyczny przecinający płaszczyznę  $S$  przewodnika,  $\omega$  — jego prędkość kątowna.

Jeżeli przewodnik z prądem będzie prostoliniowy o długości  $2l_p$ , to nie otrzyma on ruchu obrotowego,

lecz będzie przesuwiał się w kierunku prostopadłym do linii sił pola, wówczas:

$$E_i = \frac{2 l_p B S}{t} = Blv \text{ J.E.M.} = Blv \cdot 10^{-8} \text{ wolt}$$

gdzie:  $l = 2 l_p$ .

Kierunek elektromotorycznej siły indukcji określamy zapomocą prawa Fleminga prawej ręki, które ma następujące brzmienie: „Jeżeli trzy palce prawej ręki wielki, średni i wskazujący ustawimy do siebie prostopadle w ten sposób, aby wskazujący palec był ustawiony w kierunku strumienia magnetycznego, palec wielki — w kierunku ruchu przewodnika, to palec średni wskaże kierunek elektromotorycznej siły indukcji” (rys. 106), lub zapomocą prawa prawej dłoni: „Jeżeli ustawimy prawą dłoń z odchylonym w bok wielkim palcem w ten sposób, aby strumień magnetyczny wchodził prostopadle do dłoni i przeszywał ją z wewnątrz na zewnątrz, a duży palec wskazywał kierunek ruchu przewodnika, to pozostałe, razem złożone palce, wskażą kierunek elektromotorycznej siły indukcji w tym przewodniku (rys. 107).

**Reguła Lenza.** Lenz wyraził ogólną zależność pomiędzy kierunkiem prądu indukcyjnego w przewodniku (skutkiem) i zmianą strumienia magnetycznego przecinającego ten przewodnik (przyczyną) w następujący sposób: „Przy każdej zmianie wielkości strumienia magnetycznego przecinającego zamknięty przewodnik indukuje się w tym przewodniku prąd takiego kierunku, że swem działaniem elektromagnetycznym przeciwdziała wywołującej go zmianie strumienia magnetycznego.

To zn., że przy zbliżaniu magnesu do uzwojenia, powstaje w tem uzwojeniu prąd, który wytwarza do-

koła uzwojenia takie pole magnetyczne, że zbliżający się biegun magnesu jest przez to uzwojenie odpychany. Gdy będziemy oddalać magnes od uzwojenia — powstanie w nim prąd powodujący przyciąganie oddalającego się bieguna magnesu.

Kierunek prądu indukcyjnego określamy również zapomocą prawa Maxwella, które ma następujące brzmienie: „Jeżeli będziemy patrzeć na zamknięty przewód w kierunku strumienia magnetycznego objętego tym przewodnikiem, to zwiększenie się strumienia wywoła w nim prąd indukowany o kierunku przeciwnym kierunkowi wskazówki zegara, natomiast zmniejszenie się strumienia magnetycznego — prąd o kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu wskazówki zegara” (rys. 108).

Zmianę strumienia magnetycznego przecinającego obwód zamknięty możemy skutecznie albo przez bezpośrednią zmianę wielkości strumienia przecinającego nieruchomy przewód albo przez obracanie przewodnika dokoła osi w jednostajnym strumieniu magnetycznym.

**Prądy wirowe Foucault'a.** Zjawisko powstawania prądów indukcyjnych mamy również w bryłach (metalowych np. miedzianych lub żelaznych), gdy bryły te wchodzi lub wychodzą z pola magnetycznego albo też znajdują się w zmiennym polu magnetycznym.

Prądy te tworzą obwody zamknięte wewnątrz brył, nagrzewając je i swem działaniem elektromagnetycznym przeciwdziałając przyczynie je wywołującej, t. j. ruchowi bryły w jednostajnym polu magnetycznym lub zmianie strumienia magnetycznego przenikającego bryłę. Na dowód tego może służyć następujący przykład (rys. 109). Jeżeli zawiesimy na nitce mocno skręconej

sztabkę miedzianą i umieścimy ją pomiędzy biegunami elektromagnesu, to sztabka ta będzie obracała się pod wpływem rozkręcania się nitki. W chwili zamknięcia obwodu prądu w uzwojeniach elektromagnesu zauważymy, że sztabka natychmiast zatrzyma się, i w dalszym ciągu zacznie się obracać z chwilą gdy przerwiemy prąd. Zjawisko to dowodzi, że wewnątrz sztabki przecinającej przy swym ruchu obrotowym linie sił pola magnetycznego powstawały prądy indukcyjne. Prądy te nazywamy prądami wirowymi Foucault'a.

Analogiczne zjawisko powstawania prądów wirowych pokazane jest na rys. 110 w bębnie metalowym *M* wirującym pomiędzy biegunami elektromagnesu *NS* w kierunku wskazanym strzałką.

Nagrzewanie bębna będzie się odbywało w tym wypadku kosztem pracy mechanicznej, zużytej na poruszanie go w polu magnetycznym. Wielkość tej pracy straconej będzie wprost proporcjonalna do masy bębna, do jego szybkości kątowej i do wielkości indukcji magnetycznej wewnątrz bębna.

Chcąc zmniejszyć straty spowodowane prądami wirowymi, należy podzielić bęben na szereg cienkich warstw o grub. 0,3 do 0,7 mm. i izolowanych jedna od drugiej zapomocą warstwy lakieru lub bibułki. Powierzchnie rozdziału tych warstw muszą być prostopadłe do kierunku sił elektromotorycznych indukcji powstających w bębnie czyli, w danym wypadku, prostopadłe do osi bębna i równoległe do linii sił pola magnetycznego.

Można zmniejszyć szkodliwe działanie prądów wirowych przez zastosowanie do wyrobu bębnow blachy żelaznej nakrzemioniej, posiadającej znacznie większy opór elektryczny i większą przenikliwość magnetyczną od blachy zwykłej.

## Z a d a n i a.

1) Między biegunami elektromagnesu w polu magnetycznym  $H = 6000$  gausów porusza się z szybkością 6 mtr. na sekundę prostopadle do kierunku linii sił przewodnik dł. 8 cm. i średn. 2 mm. Obliczyć siłę elektromotoryczną powstającą w tym przewodniku oraz natężenie i moc prądu w drugim przewodniku o oporności 0,4 oma przyłączonym do jego końcówek.

Wielkość elektromotorycznej siły w przewodniku przecinającym linie sił będzie:

$$E_i = B l v 10^{-8} = \frac{6000 \cdot 8 \cdot 600}{10^8} = 0,288 \text{ wolta}$$

Oporność tego przewodnika będzie:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{s} = 0,018 \cdot \frac{0,08}{3,14} = 0,004 \Omega$$

Natężenie prądu w obwodzie po załączeniu drugiego przewodnika:

$$J = \frac{E}{R + r} = \frac{0,288}{0,004 + 0,4} = 0,65 \text{ Amp.}$$

Moc prądu w obwodzie:

$$W = EJ = 0,288 \cdot 0,65 = 0,19 \text{ watta.}$$

2) Na rdzeniu o przenikliwości magnetycznej  $\mu = 60$ , o poprzecznym przekroju  $S = 30 \text{ cm}^2$ , długości  $l = 10 \text{ cm}$ . zostało nawinięte uzwojenie posiadające 500 zwojów. Na tem uzwojeniu jest nawinięte 1000 zwojów drugiego uzwojenia. Obliczyć wielkość powstającej siły elektromotorycznej indukcji w uzwojeniu zewnętrznym, jeżeli prąd przepływający w uzwojeniu wewnętrznym o natężeniu 5-ciu amp. będzie przerywany co 0,01 sekundę (rys. 111).

Natężenie pola wewnątrz uzwojenia wyniesie:

$$H = 1.25 \cdot \frac{500 \cdot 5}{10} = 312,5 \text{ gausa}$$

Wielkość indukcji magnetycznej w rdzeniu będzie:

$$B = \mu H = 312,5 \cdot 60 = 18750 \text{ gausów}$$

Wielkość strumienia przenikającego przez uzwojenie zewnętrzne w momencie początkowym:

$$\Phi = BS = 18750 \cdot 30 = 562500 \text{ max.}$$

W momencie końcowym, t. j. kiedy prąd zostanie przerwany, strumień przenikający górne uzwojenie będzie równy zeru:

$$\Phi_1 = 0$$

Elektromotoryczna siła indukcji powstająca dzięki takiej zmianie strumienia magnetycznego w 1000 zwojach zewnętrznego uzwojenia będzie:

$$E_i = \frac{562500 \cdot 1000}{\frac{1}{100} \cdot 10^8} = 562,5 \text{ wolta}$$

3) Uzwojenie posiadające 320 zwojów każdy o dł. 50 cm. jest nawinięte na pierścieniu obracającym się w polu magnetycznym o całkowitym strumieniu  $\Phi = 2100000$  maxwelli. Obliczyć elektromotoryczną siłę w tem uzwojeniu, oraz natężenie i moc prądu, jeżeli do końców uzwojenia załączono przewodnik o oporności 0,65 oma, przyjmując, że uzwojenia są zrobione z drutu miedzianego o średnicy 2,4 mm. a pierścień robi 1300 obrotów na minutę.



Wielkość elektromotorycznej siły w uzwojeniach będzie:

$$E = n Z \Phi \cdot 10^{-8} = \frac{320 \cdot 1300 \cdot 2100000}{60 \cdot 10^8} = 145,6 \text{ wolta}$$

Całkowita oporność uzwojenia:

$$R = \rho \cdot \frac{4 l Z}{\pi d^2} = 0,018 \cdot \frac{4 \cdot 320 \cdot 0,5}{3,14 \cdot 2,4^2} = 0,63 \ \Omega$$

Natężenie prądu w obwodzie po załączeniu przewodnika do zacisków uzwojenia wyniesie:

$$J = \frac{E}{R + r} = \frac{145,6}{0,63 + 0,65} = 113 \text{ amp.}$$

Moc prądu w obwodzie będzie:

$$P = VJ = 145,6 \cdot 113 = 16,5 \text{ K. W.}$$

### Prąd zmienny.

**Prądy sinusoidalne.** Powróćmy do przykładu, gdy przewodnik mający kształt prostokąta wiruje dokoła osi 0 w jednostajnym polu magnetycznym (rys. 112). Wielkość powstającej w nim siły elektromotorycznej określi nam wzór:

$$E = \frac{2 B l_p s \cdot \sin \alpha}{t}$$

Jeżeli zwój obróci się o kąt  $2\pi$ , licząc od położenia, dla którego  $\alpha = 0$ , to kąt  $\alpha$  przyjmuje wszystkie wartości od 0 do  $2\pi$ . Jeżeli obrót przewodnika odbywa się ze stałą prędkością kątową  $\omega$ , to możemy powiedzieć, że w powyższym wzorze:

$$\frac{2 B l_p s}{t} = \text{const.}$$

a więc  $E = k \sin \alpha$ , gdzie  $k = \frac{2 B l_p s}{t}$  i jest w danym wypadku stałe. Widzimy więc, że wielkość siły elektromotorycznej zmienia się proporcjonalnie do  $\sin \alpha$ . Jeżeli na osiach współrzędnych będziemy odpowiednio odkładali: na osi odciętych — wielkości kąta  $\alpha$ , na osi rzędnych — wielkości siły elektromotorycznej  $E$ , to otrzymamy wykres zw. sinusoidą (rys. 112 a).

W położeniu  $\alpha = 0$ ,  $E = 0$  i wzrasta wraz ze wzrostem kąta  $\alpha$ . Dla  $\alpha = 90^\circ$ ,  $E$  osiąga maximum; przy dalszym wzroście kąta  $\alpha$  — maleje, by dla wartości  $\alpha = 180^\circ$  stać się równym zeru. W tym punkcie siła elektromotoryczna  $E$  zmienia kierunek wraz ze zmianą znaku  $\sin \alpha$  i zaczyna ponownie wzrastać ze wzrostem kąta  $\alpha$ , by dla wartości  $\alpha = 270^\circ$  osiągnąć znów maximum; następnie maleje i gdy  $\alpha = 0$ ,  $E = 0$ .

Widzimy więc, że przy obrocie przewodnika dokoła osi o kąt  $2\pi$  siła elektromotoryczna indukcji staje się dwa razy równą zeru, zmieniając przytem swój kierunek na odwrotny i dwa razy osiąga maximum.

Jeżeli w dowolnej skali jako wielkość siły elektromotorycznej  $E$  w położeniu ramki prostopadłym do strumienia magnetycznego ( $\alpha = 90^\circ$ ) przyjmiemy odcinek  $OP$ , to w każdym innym położeniu ramki znajdziemy wielkość tej siły jako odcinek prostopadłej opuszczonej z końca ramki na średnicę  $AB$  (na rys. 113 wielkość siły elektromotorycznej przy odchyleniu ramki o kąt  $\alpha$  od położenia prostopadłego do kierunku strumienia magnetycznego wyrazi odcinek  $MD$ ).

Oznaczmy siłę elektromotoryczną w dowolnej chwili przez  $E_t$ , a siłę elektromotoryczną maksymalną przez  $E_m$ , to na zasadzie powyższego, jak zresztą widać z rysunku, możemy napisać:

$$E_t = E_m \cdot \sin \alpha = E_m \cdot \sin \omega t, \text{ gdyż } \alpha = \omega t$$

pod wpływem tej siły elektromotorycznej na końcach przewodnika otrzymamy pewną różnicę potencjałów czyli napięcie, wskutek czego po przewodniku popłynie prąd o pewnym natężeniu. Napięcie i natężenie prądu w każdym położeniu przewodnika określi się w analogiczny sposób jak siła elektromotoryczna, a mianowicie:

$$V_t = V_m \cdot \sin \omega t; J_t = J_m \cdot \sin \omega t$$

Widzimy, że zarówno napięcie, jak i natężenie przechodzi przy jednym obrocie przewodnika dwa razy przez wartość 0 i dwa razy przez wartość maksymalną. Prąd taki nazywamy prądem **sinusoidalnie zmiennym**. Wogóle rozpatrywać będziemy tylko prądy sinusoidalnie zmiennie, gdyż każdy prąd zmienny niesinusoidalny można zawsze rozłożyć na prąd stały i jeden lub kilka prądów sinusoidalnych.

Zmiana napięcia i natężenia w zależności od czasu przedstawiona jest graficznie na rys. 114. Wielkości odpowiadające maksymalnym wartościom napięcia i natężenia:  $AB$ ,  $AB_1$ ,  $CD$ ,  $CD_1$ , nazywamy **amplitudami**. Czas  $T$  wciągu którego przewodnik wykona jeden obrót nazywamy **okresem**, np. jeżeli ramka robi  $n = 1500$  obrotów na minutę czyli 25 obrotów na sekundę, to na wykonanie jednego obrotu potrzebuje

czasu  $T = \frac{1}{25}$  sek. Odwrotność okresu, nazwana

**częstotliwością** i oznaczana literą  $f$  (w danym przykładzie  $f = 25$ ), wskazuje przez ile okresów przechodzą natężenie i napięcie wciągu jednej sekundy. Co do częstotliwości, to w Europie używa się  $f = 50$  okresów/sek., w Ameryce  $f = 60$ , we Francji  $f = 42$ ; zaznaczyć należy, że do oświetlenia nadaje się większa

częstotliwość  $f = 50$  lub  $60$ , gdyż przy mniejszej następuje drganie światła; do motorów można używać prąd o częstotliwości  $f = 16\frac{2}{3}$  lub  $25$ .

Wzory na napięcie i natężenie prądu możemy przedstawić również w następującej formie:

$$V_t = V_m \cdot \sin \frac{2\pi}{T} \cdot t; \quad J_t = J_m \cdot \sin \frac{2\pi}{T} \cdot t$$

wzory powyższe zarówno w tej postaci, jak i w podanej poprzednio pozwalają obliczyć napięcie i natężenie prądu w zależności od ich wartości maksymalnych, w każdym położeniu przewodnika i w każdej chwili. Wielkości te będą zmienne i wahać się będą między wartościami maksymalnymi i zerowymi.

Gdy przewodnik obróci się od położenia, gdy  $\alpha = 0$  o kąt  $\varphi$ , stanowiący  $n$ -tą część kąta  $2\pi$ , dostatecznie mały, by natężenie prądu przez czas tego obrotu można było uważać za stałe, to praca wykonana przez prąd:

$$A_1 = J_m^2 R t \cdot \sin^2 \varphi = J_m^2 R \cdot \frac{T \varphi}{2\pi} \cdot \sin^2 \varphi$$

przy dalszym obrocie o kąt  $\varphi$ , a więc przy przejściu ramki do położenia  $\alpha = 2\varphi$ :

$$A_2 = J_m^2 R t \cdot \sin^2 2\varphi = J_m^2 R \cdot \frac{T \varphi}{2\pi} \cdot \sin^2 2\varphi$$

---


$$A_n = J_m^2 R t \cdot \sin^2 n\varphi = J_m^2 R \cdot \frac{T \varphi}{2\pi} \cdot \sin^2 n\varphi$$

całkowita praca wykonana przy obrocie ramki o kąt  $2\pi$

w czasie  $T$  będzie równa sumie prac wykonanych przy poszczególnych przesunięciach ramki czyli:

$$A_s = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n = J_m^2 R \cdot \frac{T \varphi}{2 \pi} \cdot [\sin^2 \varphi + \sin^2 2 \varphi + \sin^2 3 \varphi + \dots + \sin^2 n \varphi] =$$

$$= J_m^2 R T \cdot \frac{\sin^2 \varphi + \sin^2 2 \varphi + \sin^2 3 \varphi + \dots + \sin^2 n \varphi}{\frac{2 \pi}{\varphi}} =$$

$$= J_m^2 R T \cdot \frac{\sin^2 \varphi + \sin^2 2 \varphi + \sin^2 3 \varphi + \dots + \sin^2 n \varphi}{n}$$

gdzie  $n$  ilość wyrazów znajdujących się w nawiasie, przyczem  $n = \frac{2 \pi}{\varphi}$ ; ułamek więc:

$$\frac{\sin^2 \varphi + \sin^2 2 \varphi + \sin^2 3 \varphi + \dots + \sin^2 n \varphi}{n}$$

przedstawia średnią arytmetyczną wartości, jakie przybiera kwadrat sinusa kąta  $\alpha$  przy obrocie ramki o kąt  $2 \pi$ .

Łatwo sprawdzić, obierając wartość na  $\varphi$  dajmy na to  $\frac{\pi}{10}$ , że ta średnia arytmetyczna będzie się

niewiele różniła od  $\frac{1}{2}$  i że różnica ta przy zmniej-

szaniu kąta  $\varphi$  będzie malała tak, że dla bardzo małego  $\varphi$  będzie dardzo mała i może być pominięta. Praca wówczas wyrazi się wzorem:

$$A_s = \frac{1}{2} J_m^2 R T$$

w tym samym czasie  $T$  prąd stały płynący po naszym przewodniku i posiadający natężenie  $J$  wykonałby pracę:

$$A_s = J^2 R T$$

Gdybyśmy chcieli, aby praca  $A_s = A_s$  czyli:

$$\frac{1}{2} J_m^2 R T = J^2 R T$$

musielibyśmy przepuszczać prąd stały o natężeniu:

$$J = \frac{J_m}{\sqrt{2}}$$

tę ostatnią wartość natężenia nazywamy **natężeniem skutecznym** lub **efektywnym**. Będzie to więc natężenie, jakie powinien posiadać prąd stały, aby skutki jego zarówno cieplne, jak mechaniczne były te same co danego prądu zmiennego.

To samo możemy powiedzieć o napięciu; mamy więc:

$$J_{skut} = \frac{J_m}{\sqrt{2}} = 0,707 J_m; \quad V_{skut} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0,707 V_m$$

Jeżeli napięcie i natężenie prądu przechodzą jednocześnie przez swe wartości zerowe i jednocześnie przez swe wartości maximalne, to mówimy, że są one zgodne w fazie (rys. 114). Jeżeli napięcie i natężenie są przesunięte względem siebie o pewien kąt  $\varphi$ , a może się to stać wskutek zjawisk, o których będzie następnie mowa, to mówimy, że różnica faz pomiędzy napięciem i natężeniem wynosi  $\varphi$  (rys. 115), wówczas możemy napisać:

$$V_t = V_m \cdot \sin \omega t; \quad J_t = J_m \sin (\omega t - \varphi)$$

**Moc prądu zmiennego.** Jeżeli napięcie jest w fazie z natężeniem (rys. 114), to **moc średnia** albo **rze-**

czywista prądu zmiennego równa się iloczynowi z wartości jego napięcia skutecznego przez natężenie skuteczne:

$$P = V_{sk} \cdot J_{sk}$$

albo pomijając znaczki, gdyż przy rozpatrywaniu prądu zmiennego będziemy zawsze brać pod uwagę tylko napięcie i natężenie skuteczne:

$$P = VJ = \frac{V_m \cdot J_m}{2}$$

w wypadku, gdy napięcie i natężenie są przesunięte względem siebie o kąt  $\varphi$ , to moc średnia prądu zmiennego wyniesie:

$$P = VJ \cdot \cos \varphi = \frac{V_m \cdot J_m}{2} \cdot \cos \varphi$$

Wielkość  $VJ$  nazywamy **mocą pozorną**, a stosunek mocy rzeczywistej do mocy pozornej równy  $\cos \varphi$  nazywamy **spółczynnikiem mocy**.

Z równania powyższego widzimy, że moc w danym wypadku może przybierać wartości ujemne (na rys. 116 moc ujemna zakreskowana); to znaczy, że źródło prądu może się stać odbiornikiem. Wyobraźmy sobie źródło prądu i odbiornik (rys. 117) posiadający elektromagnesy (silnik). W odbiorniku takim skutek zmiennego natężenia prądu powstaje siła elektromotoryczna przeciwna do siły elektromotorycznej źródła. Siła ta w pewnej chwili przewyższa siłę elektromotoryczną źródła i prąd wówczas płynie w kierunku przeciwnym, czyli źródło staje się chwilowym odbiornikiem. Widzimy więc, że odbiorniki, w których może powstawać siła elektromotoryczna są odwracalne, t. j. oddają energję otrzymaną ze źródła na zewnątrz i pochłaniają energję. Natomiast odbiorniki bez siły elektromotorycznej tylko wydzielają energję na zewnątrz

w formie ciepła; posiadają one opór elektryczny omowy który nie wiąże się z kierunkiem prądu (lampy, grzejniki).

**Oporność omowa dla prądów zmiennych.** Podstawą do określenia oporności omowej przewodnika po którym płynie prąd zmienny, służy ilość wytworzonego w jednostkę czasu ciepła. Moc równoważna tej ilości ciepła wyraża się wzorem:

$$P = J^2 R; \text{ stąd } R = \frac{P}{J^2}$$

Charakterystyczną cechą tej oporności jest to, że dla prądów stałych i zmiennych o małej częstotliwości jest ona jednakowa. Natomiast dla prądów o dużej częstotliwości oporność omowa zwiększa się. Powstaje to wskutek t. zw. naskórkowości albo skin-effektu (z angielskiego).

**Naskórkowość.** Zjawisko naskórkowości przejawia się specjalnie wybitnie przy dużej częstotliwości prądu i dużych przekrojach poprzecznych przewodnika; polega ono na niejednostajnym rozłożeniu prądu w przekroju, wskutek czego straty na ogrzanie przewodnika powiększają się. Każdy przewodnik możemy rozpatrywać (rys. 118) jako pęk niezmiernie cienkich drutów razem złożonych. Przy zmianie natężenia prądu w przewodniku zmienia się natężenie prądu w każdym z drucików. Strumień magnetyczny, powstający wskutek prądu przepływającego przez poszczególne druciki i stanowiący część ogólnego strumienia magnetycznego, zmienia się wraz ze zmianą natężenia prądu drucików, wywołując siłę elektromotoryczną przeciwną sile elektromotorycznej prądu nie tylko w danym druciku, lecz i w sąsiednim, przyczem w drucikach bliżej położonych do danego siła ta jest większa, niż w bar-



dziej oddalonych. Ponieważ druciki leżące w pobliżu osi przewodnika, biorąc średnio, będą mniej oddalone od pozostałych, aniżeli druciki leżące bliżej obwodu, więc siła elektromotoryczna indukcyjna w nich będzie większa. Część więc środkowa przewodnika przedstawia prądowi jak gdyby większy opór.

Spadek potencjału na jednostkę długości w każdym z tych drucików wyrazi się w tym wypadku jako suma spadku potencjału wywołanego oporem omowym  $\left( \frac{J l}{s} \cdot \rho = j \cdot l \cdot \rho \right)$  i powstającą siłą elektromotoryczną indywidualną dla każdej warstwy przewodnika, czyli:

$$V = j \rho + \frac{\Phi_o - \Phi_t}{t} \cdot 10^{-8}; \quad \text{skąd}$$

$$j = \frac{V}{\rho} - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Phi_o - \Phi_t}{t} \cdot 10^{-8}$$

pierwsza część tego równania jest jednakowa dla wszystkich drucików jednorodnego przewodnika, od drugiej więc części tego równania:

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Phi_o - \Phi_t}{t} \cdot 10^{-8}$$

gdzie  $\frac{\Phi_o - \Phi_t}{t} \cdot 10^{-8}$  jest to zmiana strumienia magne-

tycznego w jednostkę czasu w odniesieniu do poszczególnego drucika, zależy niejednostajne rozłożenie prądu w przekroju.

Niejednostajność więc rozłożenia prądu w przekroju jest odwrotnie proporcjonalna do okresu i oporności właściwej, a wprost proporcjonalna do przenikliwości magnetycznej  $\mu$  przewodnika, gdyż od przenikliwości magnetycznej zależy wielkość strumienia  $\Phi$ .

Przy prądach szybkozmiennych nie należy więc używać przewodników żelaznych, posiadających wielką przenikliwość magnetyczną, w których działanie skin-effektu jest bardzo duże.

W radjotelegrafji, gdzie mamy do czynienia z prądami szybkozmiennymi, w celu wyzyskania całego przekroju używamy przewodników: a) w kształcie cienkich wstęg miedzianych o dużej powierzchni, b) w kształcie rur miedzianych o cienkich ściankach, c) w kształcie przewodników składających się z dużej ilości splecionych pomiędzy sobą cienkich drucików miedzianych o średnicy około 0,1 mm.

**Samoindukcja.** Jeżeli natężenie prądu w przewodniku będzie ulegało zmianie, to jednocześnie będzie się zmieniać i otaczające ten przewodnik pole magnetyczne. Dzięki temu w przewodniku tym powstanie elektromotoryczna siła indukcji. Ta nowa elektromotoryczna siła, zależnie od zmian natężenia, współdziała lub przeciwdziała elektromotorycznej sile wywołującej prąd w danym przewodniku. Powoduje to odmienny, niż w wypadku gdy elektromotoryczna siła indukcji nie powstaje, przebieg natężenia prądu.

Taki wpływ pola magnetycznego wytworzonego przez przewodnik z prądem na przebieg prądu w tym przewodniku nazywamy **samoindukcją**. Elektromotoryczną siłę indukcji powstającą w przewodniku pod wpływem zmiany własnego pola magnetycznego nazywamy elektromotoryczną siłą samoindukcji, a powstający dzięki niej prąd w przewodniku — prądem samoindukcyjnym.

Zjawisko samoindukcji będziemy mieli przy każdej zmianie natężenia prądu w obwodzie, a więc zarówno w obwodzie z prądem zmiennym, jak i w obwodzie z prądem stałym w chwili zamykania i otwierania obwodu.

**Spółczynnik samoindukcji lub indukcyjność.** Wielkość strumienia magnetycznego wytwarzanego przez prąd stały płynący po przewodniku o danej długości zależy od kształtu tego przewodnika, a więc w szczególności od bezwzględnej ilości zwojów i od ilości zwojów przypadających na jednostkę długości, poza tem wielkość ta zależy od natężenia prądu.

Gdy zapomocą klucza  $K$  zamkniemy przedstawiony na rys. 119 obwód, to wielkość strumienia magnetycznego  $\Phi_1$ , powstałego dokoła solenoidu  $AB$ , dzięki prądowi płynącemu z ogniw  $E$ , będzie proporcjonalna do natężenia tego prądu  $J_1$ . Jeżeli zapomocą opornika  $R$  będziemy zmieniać natężenie prądu, to strumień magnetyczny dokoła solenoidu będzie również ulegał odpowiednim zmianom, stosunek jednak wielkości strumienia magnetycznego do natężenia prądu będzie stały, t. j.:

$$\frac{\Phi_1}{J_1} = \frac{\Phi_2}{J_2} = L$$

gdzie wielkości natężenia prądu  $J_1$ ,  $J_2$ , oraz wielkości strumienia magnetycznego  $\Phi_1$  i  $\Phi_2$  są wyrażone w jednostkach  $JEM$ . Jeżeli natężenie prądu wyrazimy w amperach, to:

$$L = \frac{\Phi}{J} = \frac{10 \Phi}{J}$$

Wielkość  $L$ , charakteryzującą przewodnik pod względem jego zdolności w wytwarzaniu dokoła siebie strumienia magnetycznego pod wpływem przepływającego przezeń prądu, nazywamy współczynnikiem **samoindukcji lub indukcyjnością**.

Zakładając  $\Phi = 1 JEM$  i  $J = 1 JEM$  otrzymamy  $L = 1 JEM$ , czyli jednostką współczynnika

samoindukcji będzie współczynnik samoindukcji przewodnika, w którym prąd o natężeniu  $1 JEM$ , wywołuje dokoła niego strumień magnetyczny równy  $1 JEM$  (maksvell). Jednostkę współczynnika samoindukcji nazywamy centymetrem, gdyż posiada ona wymiar ( $L^1$ ) taki sam jak długość. Praktyczną jednostką współczynnika samoindukcji jest henry  $= 10^9 JEM$  współczynnika samoindukcji. Jedną tysięczną część henry (0,001 henry) nazywamy milihenry, milionową część henry (0,00001 henry) — mikrohenry. Jeżeli solenoid będzie posiadał długość  $l$  cm., poprzeczny przekrój  $S$  cm<sup>2</sup>, ilość zwojów —  $Z$ , to prąd o natężeniu  $J = 1 JEM = 10$  amp. wytworzy wewnątrz tego solenoidu pole magnetyczne o natężeniu:

$$H = 1,25 \cdot \frac{ZJ}{l} = 1,25 \cdot \frac{Z}{l} \cdot 10 = 12,5 \cdot \frac{Z}{l} \text{ gausów}$$

Strumień magnetyczny przenikający  $Z$  zwojów solenoidu:

$$\Phi = HSZ = 12,5 \cdot \frac{Z^2 S}{l}$$

stąd otrzymamy współczynnik samoindukcji solenoidu:

$$L = 12,5 \cdot \frac{Z^2 S}{l} JEM = 12,5 \cdot \frac{Z^2 S}{l} \cdot 10^9 \text{ henry.}$$

Jeżeli wewnątrz solenoidu wstawimy rdzeń żelazny o przenikliwości magnetycznej  $\mu$ , to współczynnik samoindukcji solenoidu będzie:

$$L = 12,5 \cdot \frac{Z^2 S}{l} \mu \cdot 10^9 \text{ henry.}$$

Jak widzimy z tego wzoru wielkość współczynnika samoindukcji zależy nie tylko od wymiarów i kształtu przewodnika, lecz i od magnetycznych własności ośrodka, w którym ten przewodnik się znajduje.

Uzwojenia, wewnątrz których znajduje się rdzeń żelazny, a więc posiadające duży współczynnik samoindukcji odgrywają wielką rolę w obwodach z prądem zmiennym. Uzwojenia takie posiadają zazwyczaj kształt krótkiego solenoidu o dużej ilości zwojów z grubym rdzeniem żelaznym wewnątrz, lub kształt spirali płaskiej, przedstawionej na rys. 120. Takie uzwojenia noszą nazwę cewek dławikowych lub cewek samoindukcyjnych, albo wprost dławików. Spotykamy je często w telegrafii, telefonii i radjotelegrafii.

W radjotelegrafii zachodzi potrzeba posiadania cewek samoindukcyjnych, których współczynnik samoindukcji można byłoby łatwo zmieniać. Na rys. 121 szematycznie przedstawiona jest cewka samoindukcyjna zwana warjometrem. Zapomocą kontaktu ślizgowego możemy włączać tylko część zwoi w obwód, zmieniając w ten sposób jej współczynnik samoindukcji.

Obecność solenoidu z rdzeniem żelaznym o dużej ilości zwojów czyli cewki dławikowej w obwodzie z prądem zmiennym wpływa na zmniejszenie natężenia prądu. Zachodzi więc niekiedy potrzeba usunięcia tego działania. Uskuteczniamy to zapomocą stosowania uzwojenia bifilarnego (rys. 122). Uzwojenie to składa się z przewodnika złożonego we dwoje i w ten sposób nawiniętego. Przy takim nawinięciu w sąsiednich zwojach płynie prąd w kierunkach przeciwnych i wytwarza strumienie magnetyczne prawie równe lecz przeciwnie skierowane, a więc znoszące swoje działania. Taka cewka bifilarnie nawinięta posiada współczynnik samoindukcji  $L \cong 0$ , t. j. prawie nie jest zdolna do wytwarzania pola magnetycznego.

**Wielkość elektromotorycznej siły samoindukcji.** Jeżeli po uzwojeniu o współczynniku samoindukcji  $L$  płynie prąd o natężeniu  $J_{t1}$ , to wielkość strumienia magnetycznego wytworzonego dokoła tego uzwojenia

$\Phi_{t_1} = L J_{t_1}$ . Jeżeli natężenie prądu w tem uzwojeniu ulegnie zmianie i będzie wynosić  $J_{t_2}$ , to wielkość strumienia magnetycznego będzie  $\Phi_{t_2} = L J_{t_2}$ . Wielkość zmiany strumienia magnetycznego wywołanej przez zmianę natężenia prądu w uzwojeniu będzie:  $\Phi = \Phi_{t_1} - \Phi_{t_2} = L (J_{t_1} - J_{t_2})$ . Jeżeli ta zmiana strumienia magnetycznego odbyła się w przeciągu czasu  $t = t_1 - t_2$ , to wielkość elektromotorycznej siły samoindukcji, która powstanie w tym przewodniku dzięki tej zmianie strumienia magnetycznego będzie:

$$E_s = \frac{\Phi_{t_1} - \Phi_{t_2}}{t} \cdot 10^{-8} = \frac{L (J_{t_1} - J_{t_2})}{t} \cdot 10^{-8} = \\ = \frac{L J}{t} \cdot 10^{-8} \text{ wolt}$$

gdzie wielkości spółczynnika samoindukcji  $L$  i natężenia  $J$  są wyrażone w jednostkach elektromagnetycznych. Jeżeli wielkości  $L$  i  $J$  wyrażamy w jednostkach praktycznych, to wielkość elektromotorycznej siły samoindukcji będzie:

$$E_s = \frac{L \cdot 10^9 \cdot 10}{t \cdot 10^8} = \frac{L J}{t} \text{ wolt.}$$

Jeżeli czas, w którym zajdzie zmiana strumienia będzie bardzo mały czyli  $t_1 \cong t_2$ , to tak jak poprzednio możemy napisać:

$$\Phi_{t_1} = L J_{t_1} \text{ i } \Phi_{t_2} = L J_{t_2} \\ E_s = \frac{\Phi_{t_1} - \Phi_{t_2}}{t_1 - t_2} = \frac{L (J_{t_1} - J_{t_2})}{t_1 - t_2} = \frac{L J_m}{t_1 - t_2} \cdot \\ \left( \sin \frac{2\pi}{T} \cdot t_1 - \sin \frac{2\pi}{T} \cdot t_2 \right) = \frac{2 L J_m}{t_1 - t_2} \cdot \\ \sin \left( \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{t_1 - t_2}{2} \right) \cdot \cos \left( \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{t_1 + t_2}{2} \right).$$

Ponieważ  $t_1$  i  $t_2$  różnią się o bardzo małą wielkość, więc możemy zamiast  $\sin \left( \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{t_1 - t_2}{2} \right)$  podstawić wartość kąta  $\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{t_1 - t_2}{2} = \frac{\pi}{T} \cdot (t_1 - t_2)$  i zamiast  $\cos \left[ \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{t_1 + t_2}{2} \right] = \cos \left( \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{2t}{2} \right) = \cos \frac{2\pi}{T} \cdot t$ , gdzie  $t \cong t_1 \cong t_2$ , skąd:

$$\begin{aligned} E_s &= \frac{2LJ_m}{t_1 - t_2} \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{t_1 - t_2}{2} \cdot \cos \frac{2\pi}{T} \cdot t = \\ &= LJ_m \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot \cos \frac{2\pi}{T} t = L\omega J_m \cdot \cos \omega t = \\ &= L\omega J_m \sin(\omega t + 90^\circ), \text{ gdzie } \omega = \frac{2\pi}{T}. \end{aligned}$$

Widzimy, że siła elektromotoryczna samoindukcji będzie również sinusoidalnie zmienna; faza jej będzie przesunięta względem siły elektromotorycznej źródła o kąt  $\varphi = 90^\circ$ .

Przy dużym współczynniku samoindukcji  $L$  i wielkiej częstotliwości prądu elektromotoryczna siła samoindukcji może przewyższyć elektromotoryczną siłę źródła zasilającego to uzwojenie. Dla zmniejszenia elektromotorycznej siły samoindukcji należy zmniejszyć częstotliwość prądu w obwodzie albo zmniejszyć magnetyczne własności obwodu, t. j. współczynnik samoindukcji. Lampki i oporniki posiadają indukcyjność prawie  $= 0$ , natomiast silniki, elektromagnesy mają bardzo duży współczynnik samoindukcji.

Np. w chwili przerywania prądu na zaciskach źródła prądu będziemy mieli napięcie równe sumie sił elektromotorycznych źródła i samoindukcji:

$$V = E_{\text{zr}} + E_s$$

wskutek tego powstaje tam iskra przy przerywaniu prądu elektrycznego; jest to zjawisko ujemne, gdyż opalają się przytem kontakty; dlatego w urządzeniach, gdzie przerywa się często prąd, np. w silnikach tramwajowych stosuje się specjalne gaśniki elektromagnetyczne, które powstającą iskłę jakby wydmuchują.

**Kierunek prądu samoindukcyjnego.** Na mocy reguły Lenca możemy określić kierunek prądu samoindukcyjnego wywołanego w obwodzie przez elektromotoryczną siłę samoindukcji. Kierunek ten będzie zawsze taki, by prąd nowopowstały przeciwdziałał zmianom prądu głównego w tym samym obwodzie.

W ten sposób kierunek prądu samoindukcyjnego jest zgodny z kierunkiem prądu głównego, kiedy prąd główny ulega zmniejszeniu, i przeciwny kierunkowi prądu głównego, kiedy prąd główny ulega zwiększeniu. Możemy powiedzieć, że prąd samoindukcyjny wywiera taki wpływ na prąd główny, jakby chciał utrzymać w obwodzie stałą wielkość natężenia prądu głównego.

Z tego wynika, że prąd samoindukcyjny pod względem swego działania na prąd główny w tym samym obwodzie przypomina nam działanie bezwładności ciał przy zmianie ich stanu spoczynku lub ruchu jednostajnego prostoliniowego. Dzięki tej analogji, zjawisko samoindukcji nazywamy również bezwładnością elektromagnetyczną.

### **Wpływ samoindukcji w obwodzie z prądem stałym.**

Jak już wspomnieliśmy, w obwodzie prądu stałego zjawisko samoindukcji zachodzi tylko w chwili zamknięcia i otwarcia prądu. Prądy samoindukcyjne powstające wówczas w obwodzie noszą nazwę ekstrapądów.

Jeżeli obwód, jak mówimy, „posiada samoindukcję”, t. j. posiada współczynnik samoindukcji  $L$  o pewnej



określonej wartości, to w chwili zamknięcia tego obwodu strumień magnetyczny przenikający ten obwód wzrośnie od wielkości  $\Phi = 0$  do wielkości  $\Phi = L J$ . Dzięki temu w obwodzie tym powstanie prąd samoindukcyjny, zwany ekstraprądem zamknięcia, posiadający kierunek przeciwny do kierunku prądu głównego w tym obwodzie.

Ekstraprąd zamknięcia powoduje zjawisko polegające na tem, że prąd główny dojdzie do swego normalnego natężenia:  $J = \frac{E}{R}$  nie odrazu, lecz po pe-

wnym czasie i tym dłuższym, im jest większy współczynnik samoindukcji obwodu. Jeżeli na osiach współrzędnych przedstawimy graficznie przebieg natężenia w zależności od czasu, odkładając na osi rzędnych odpowiednią wielkość natężenia prądu, to otrzymamy krzywą przedstawioną na rysunku 123, której część  $OA$  będzie wskazywała przebieg natężenia prądu przy zamknięciu obwodu, odcinek  $OF = t$  — czas, wciągu którego trwał ekstraprąd zamknięcia. Od tej chwili prąd w obwodzie będzie posiadał normalne natężenie

$J = \frac{E}{R}$ , wskazane na rysunku przez odcinek  $OC = AF = BG$ .

Jeżeli po upływie czasu  $t = OG$  przerwiemy obwód, to strumień magnetyczny przenikający ten obwód zmaleje od wielkości  $\Phi = L J$  do wielkości  $\Phi = 0$ , dzięki czemu w obwodzie tym powstanie prąd samoindukcyjny, zwany ekstraprądem otwarcia, posiadający kierunek zgodny z kierunkiem prądu głównego w tym obwodzie. Krzywa  $BD$  wskaże przebieg natężenia prądu przy otwieraniu obwodu, a odcinek  $DG = t$  — czas, w przeciągu którego trwał ekstraprąd otwarcia.

Poglądowy przykład wpływu ekstraprądu otwarcia przedstawia obwód pokazany na rysunku 124-ym, na którym do końców uzwojenia elektromagnesu  $AB$  (duży współczynnik samoindukcji) włączona jest równolegle żarówka  $C$ . Jeżeli zamkniemy obwód, to wpływu ekstraprądu zamknięcia nie będziemy obserwowali, gdyż będzie on polegał na niewidzialnym powolnym narastaniu natężenia prądu; żarówka  $C$  będzie normalnie świeciła podczas przepływu prądu w obwodzie. Kiedy otworzymy obwód, to zauważymy, że żarówka silniej zaświeci, a nawet może się przepalić dzięki ekstraprądowi otwarcia, który przejdzie przez uzwojenie elektromagnesu  $AB$  w tym samym kierunku co i prąd główny, a przez żarówkę w kierunku odwrotnym wskazanym na rysunku strzałką kreskowaną.

**Potencjalna energia prądu czyli energia strumienia magnetycznego.** W chwili zamykania obwodu prąd narasta powoli do swej normalnej wartości czyli pewna ilość elektryczności  $Q_1 = J_1 t$ , dostarczona przez źródło prądu, a graficznie przedstawiona na rys. 123-im zapomocą powierzchni  $OAC$  (zakreskowanej) nie dopłynęła przy zamknięciu obwodu. Natomiast w chwili otwarcia obwodu pewna ilość elektryczności  $Q_2 = J_2 t$ , przedstawiona graficznie na rys. 123 zapomocą powierzchni  $DBG$  (zakreskowanej), nie dostarczana już przez źródło prądu, przypłynie przy otwieraniu obwodu. Średnie wartości natężenia prądu  $J_1$  podczas zamykania, oraz  $J_2$  podczas otwierania obwodu możemy przyjąć równe połowie normalnej wartości prądu głównego, t.j.  $J_1 = J_2 = \frac{J}{2}$ ; jeżeli

zaś przyjmiemy, że elektromotoryczna siła samoindukcji  $E_1$  przy zamykaniu i  $E_2$  przy otwieraniu obwodu są równe i stanowią połowę wartości głównej

elektromotorycznej siły, t. j.  $E_{s_1} = E_{s_2} = \frac{E_s}{2}$ , to

średnia wartość czynnej elektromotorycznej siły przy zamykaniu i otwieraniu obwodu będzie:

$$E = \frac{E_s}{2} = E_{s_1} = E_{s_2} = \frac{LJ}{t}.$$

Ilość energii elektrycznej dostarczonej przez źródło prądu przy zamykaniu obwodu, która nie przekształciła się w energję kinetyczną prądu płynącego po obwodzie, będzie:

$$A_1 = EJt = \frac{LJ}{t} \cdot \frac{J}{2} \cdot t = \frac{LJ^2}{2} \text{ dżauli}$$

gdzie  $L$  jest wyrażone w henry,  $J$  — w amperach.

Energja ta jest energją potencjalną prądu w postaci całego strumienia magnetycznego  $\Phi = LJ$ , przenikającego ten obwód podczas całego czasu trwania prądu w obwodzie.

Możemy powiedzieć, że wielkość energii magnetycznej w postaci potencjalnej zawartej w stałym strumieniu magnetycznym, wytworzonym przez prąd o natężeniu  $J$  płynący po obwodzie o współczynniku samoindukcji  $L$  będzie:

$$A = \frac{\Phi J}{2} = \frac{LJ^2}{2} \text{ dżauli}$$

jeżeli  $\Phi$  wyrazimy w makswellach, a  $J$  — w amperach. Jest to wielkość pracy, którą może wykonać znikający strumień magnetyczny.

W chwili otwierania obwodu prąd znika, a razem z nim znika i strumień magnetyczny, wywołując w obwodzie ekstraprąd otwarcia, czyli energja zawarta w strumieniu magnetycznym  $A$  całkowicie przekształca

się w energję kinetyczną prądu  $A_2$ ; przyjmując  $t_2 = t_1$ , możemy napisać:  $A_2 = A = A_1$ , t. j. przy zamykaniu obwodu energja kinetyczna prądu elektrycznego przekształca się w energję potencjalną prądu w postaci stałego strumienia magnetycznego przenikającego ten obwód podczas całego czasu trwania prądu, a przy otwieraniu obwodu ta ostatnia przekształca się znowu w energję kinetyczną prądu elektrycznego.

Na mocy tego możemy powiedzieć, że ilość elektryczności dostarczonej przez źródło, która nie przepłynęła w obwodzie przy jego zamykaniu —  $Q_1$ , i ilość elektryczności, która przypływa w obwodzie przy jego otwieraniu jako nadmiar —  $Q_2$  są równe czyli  $Q_1 = Q_2$ .

**Wpływ samoindukcji w obwodzie z prądem zmiennym.** Jeżeli obwód z prądem zmiennym posiada cewkę indukcyjną  $L$  (rys. 125), to w tym obwodzie nieustannie powstaje prąd samoindukcyjny przeciwdziałający każdej zmianie natężenia prądu głównego. Wpływ samoindukcji w obwodzie z prądem zmiennym na przebieg tego prądu wywiera wpływ podobny do oporności, dlatego też wpływ samoindukcji nazywamy **opornością indukcyjną** lub **induktancją**. Oporność indukcyjną mierzymy również w omach.

Ilość zmian strumienia magnetycznego powstającego dokoła obwodu z prądem zmiennym odpowiada częstotliwości prądu zmiennego w tym obwodzie. Zależnie od wielkości tego strumienia magnetycznego czyli od współczynnika samoindukcji obwodu oraz od częstotliwości prądu, prąd samoindukcyjny będzie więcej lub mniej wpływał na zmianę natężenia prądu głównego.

Dzięki wpływom prądu samoindukcyjnego na prąd główny wartość natężenia tego ostatniego nie będzie się zmieniać równocześnie ze zmianą wartości siły

elektromotorycznej źródła prądu i napięcia. W chwili zamykania obwodu będziemy mieli zwiększanie się strumienia magnetycznego oraz prąd samoindukcyjny o kierunku przeciwnym prądowi głównemu; następnie, gdy napięcie na zaciskach źródła prądu, po osiągnięciu swego maximum (rys. 126) zacznie się zmniejszać strumień magnetyczny również będzie się zmniejszał, a prąd samoindukcyjny będzie tego samego kierunku co i prąd główny, a więc przedłuży on istnienie prądu głównego. Będziemy więc mieli dzięki temu opóźnienie się wzrostu natężenia względem napięcia przy jednoczesnym zmniejszeniu się natężenia prądu w stosunku do natężenia, któreby miało miejsce, gdyby miała wpływ tylko oporność omowa (na rys. wykres kreskowany).

Wypadkowa siła elektromotoryczna, równa sumie sił elektromotorycznych źródła i samoindukcji, w każdej chwili ma do pokonania opór omowy przewodnika, czyli:

$$E_t + E_{st} = E_t - J_m \omega L \cdot \sin(\omega t + 90^\circ) = R J_m \cdot \sin \omega t$$

$$\begin{aligned} \text{skąd: } E_t &= R J_m \cdot \sin \omega t + J_m \omega L \cdot \sin(\omega t + 90^\circ) = \\ &= J_m [R \cdot \sin \omega t + \omega L \cdot \sin(\omega t + 90^\circ)] \end{aligned}$$

jeżeli odcinek  $AB$  przedstawia w skali wartość siły elektromotorycznej źródła dla  $\varphi = \omega t$ , to wartość  $J_m \omega L \cdot \sin(\omega t + 90^\circ)$  przedstawi odcinek  $A'B'$  prostopadłej opuszczonej z punktu przecięcia okręgu koła o promieniu  $J_m \omega L$  i promienia  $OA'$  przesuniętego względem promienia  $OA$  o kąt  $90^\circ$  (rys. 126a).

Jeżeli z punktu  $A'$  poprowadzimy równoległą do  $OA$  i odetniemy na niej odcinek  $A'C = J_m R$ , to rzut odcinka  $OC$  na prostą poziomą, dla dowolnej wartości  $\omega t$ , będzie równy sumie rzutów odcinków  $OA$  i  $OA'$

czyli sumie rzutów  $J_m R$  i  $J_m L \omega$ ; odcinek więc  $OC = \sqrt{A O^2 + A' O^2}$  przedstawia w skali amplitudę siły elektromotorycznej  $E_t$ , czyli możemy napisać:

$$E_t = \sqrt{J_m^2 R^2 + J_m^2 \omega^2 L^2} \cdot \sin(\omega t + \varphi) = \\ = J_m \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

gdzie  $\varphi$  — kąt między odcinkami  $OA$  i  $OC$ , przyczem  $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R}$

Jeżeli jako  $R$  uwzględnimy jedynie opór zewnętrzny obwodu, to możemy napisać:

$$V_t = J_m \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

$$V_m = J_m \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

mając dane napięcie  $V_t = V_m \cdot \sin \omega t$ , znajdziemy  $J_t$  ze wzoru:

$$J_t = \frac{V_m \cdot \sin(\omega t - \varphi)}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

gdyż o ile przesunięcie  $V_t$  względem  $J_t$  jest  $+$   $\varphi$ , to przesunięcie  $J_t$  względem  $V_t$  będzie  $-$   $\varphi$ .

Skuteczne natężenie prądu:

$$J = \frac{J_m}{\sqrt{2}} = \frac{V_m}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

widzimy więc że wskutek samoindukcji zmniejsza się skuteczne natężenie prądu:

$$\frac{V}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} < \frac{V}{R}$$

iloczyn  $\omega L$  nazywamy opornością urojoną lub indukcyjną obwodu; jak wynika ze wzoru:

$$E_{st} = J_m \omega L \cdot \sin(\omega t + 90^\circ)$$

wielkość  $\omega L$  mierzymy w omach.

Jeżeli wielkość kąta  $\varphi$  przesunięcia fazy natężenia prądu względem napięcia będzie  $90^\circ$ , to energia elektryczna prądu ze źródła przenosi się do obwodu zewnętrznego i przekształca się tam w energję strumienia magnetycznego, a następnie znikające pole magnetyczne w obwodzie zewnętrznym wytwarza energję elektryczną prądu, który wraca z powrotem do źródła. W takich okolicznościach płynący po obwodzie prąd zmienny nazywamy prądem bezwatowym, t. j. jego moc  $P=0$ .

### Zadanie.

Pomiędzy zaciskami źródła prądu zmiennego włączona jest cewka o współczynniku samoindukcji  $L = 0,1$  henry i o oporności omowej  $R = 10$  omów; obliczyć skuteczne natężenie prądu w tym obwodzie, jeżeli skuteczna wartość napięcia na zaciskach źródła prądu jest  $V = 110$  volt, częstotliwość prądu  $f = 50$  okresów/sek. ( $50 \sim$ /sek.).

Opór indukcyjny cewki:

$$2\pi fL = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,1 = 31,4 \text{ oma}$$

całkowity opór obwodu:

$$\sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = \sqrt{10^2 + 31,4^2} = 39,95 \text{ oma}$$

skuteczna wartość natężenia prądu w obwodzie:

$$J = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = \frac{110}{39,95} = 27,5 \text{ amp.}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R} = \frac{31,4}{10} = 3,14; \quad \varphi = 72^\circ 20'$$

**Wpływ pojemności w obwodzie z prądem zmiennym.** Jeżeli do zacisków *a b* źródła prądu o napięciu  $V_l = V_m \sin \omega t$  przyłączymy obwód zawierający kondensator *K*, to pod wpływem istniejącego napięcia kondensator naładuje się, przyczem ładunek *Q* będzie proporcjonalny do pojemności *C* kondensatora (rys. 127a):

$$Q_{t_1} = C V_{t_1} = C V_m \cdot \sin \omega t_1$$

jeżeli w przewodnikach łączących kondensator ze źródłem nie zachodzi spadek potencjału, to napięcie na okładkach kondensatora będzie zawsze równe napięciu na końcówkach źródła prądu.

W związku ze zmianą napięcia zmienia się i ładunek kondensatora i będzie wynosił w chwili  $t_2$ :

$$Q_{t_2} = C V_m \cdot \sin \omega t_2$$

a więc przyrost ładunku na jednostkę czasu będzie:

$$\begin{aligned} \frac{Q_{t_1} - Q_{t_2}}{t_1 - t_2} &= \frac{C V_m (\sin \omega t_1 - \sin \omega t_2)}{t_1 - t_2} = \\ &= C V_m \cdot \frac{1}{t_1 - t_2} \cdot 2 \sin \frac{\omega t_1 - \omega t_2}{2} \cdot \cos \frac{\omega t_1 + \omega t_2}{2} \end{aligned}$$

jeżeli  $t_1 \cong t_2$  czyli zmiana odbyła się w bardzo krótkim czasie, jak w poprzednim rozdziale, możemy

podstawić zamiast  $\sin \frac{\omega t_1 - \omega t_2}{2}$  wartość kąta

$\frac{\omega(t_1 - t_2)}{2}$  i zamiast  $\cos \frac{\omega t_1 + \omega t_2}{2}$  wielkość  $\cos \omega t$ ,

gdzie  $t_1 \cong t_2 \cong t$ ,

a więc:

$$\frac{Q_{t_1} - Q_{t_2}}{t_1 - t_2} = C V_m \omega \cdot \cos \omega t = \omega C V_m \cdot \sin (\omega t + 90^\circ)$$



taka ilość elektryczności musi przepłynąć po przewodniku od  $a$  przez  $G$  do  $A$  czyli:

$$J_t = \omega C V_m \cdot \sin(\omega t + 90^\circ)$$

Dzięki indukcji elektrostatycznej w chwili  $t_1$  powstaną na okładce  $B$  dwa ładunki  $+ Q_{t1}$  i  $- Q_{t1}$ , z których ładunek  $+ Q_{t1}$  spłynie przez galwanometr  $G_1$  do zacisku  $b$  źródła prądu. Ze zmianą ładunku na okładce  $A$  zmieni się również ładunek na okładce  $B$  i w chwili  $t_2$  będzie wynosił  $Q_{t2}$ , a w czasie od  $t_1$  do  $t_2$  przepłynie do zacisku  $b$  ilość elektryczności równa  $Q_{t1} - Q_{t2}$ .

W obydwuch więc częściach obwodu będzie płynął prąd o natężeniu:

$$J_t = \omega C V_m \cdot \sin(\omega t + 90^\circ)$$

Galwanometry  $G$  i  $G_1$  wykażą odchylenia tylko podczas ładowania kondensatora  $K$ ; kiedy jednak różnica potencjałów na okładkach kondensatora będzie równa maksymalnej różnicy potencjałów na zaciskach źródła, prądu w obwodzie nie będzie i galwanometry nie wykażą żadnego odchylenia.

Jeżeli teraz elektromotoryczna siła źródła prądu zacznie się zmniejszać, to kondensator  $K$  będzie się rozładowywał w kierunku przeciwnym kierunkowi prądu ze źródła (rys. 127b) i w obwodzie popłynie prąd w kierunku od  $A$  przez  $a$ ,  $b$  do  $B$ . Galwanometry  $G$  i  $G_1$  wykażą znowu odchylenie, lecz w przeciwnym kierunku niż poprzednio, gdyż prąd wyładowania kondensatora będzie o większym natężeniu niż prąd źródła.

Kiedy elektromotoryczna siła źródła prądu będzie równa 0, to prąd w obwodzie będzie posiadał największą wartość, gdyż wówczas będzie płynął w obwodzie tylko prąd wyładowania kondensatora  $K$ .

Kiedy elektromotoryczna siła źródła prądu zmieni swój kierunek, wówczas prąd w obwodzie będzie wzrastał i ładował kondensator w przeciwnym kierunku niż poprzednio, do tego czasu, aż różnica potencjałów na okładkach  $A B$  kondensatora i zaciskach  $a b$  źródła będzie jednakowa, wówczas prądu w obwodzie nie będzie i t. d.

Z powyższego widzimy że kondensator w obwodzie z prądem zmiennym nie przerywa całości obwodu, gdyż prąd w obu wypadkach przechodzi w tym samym kierunku po obu częściach obwodu rozdzielonych kondensatorem. Dlatego też mówimy, że prąd zmienny przechodzi przez kondensator. Prócz tego widzimy że dzięki obecności w obwodzie kondensatora prąd nie będzie zmieniać swej wartości równocześnie ze zmianą wartości elektromotorycznej siły źródła prądu i napięcia, lecz będzie je ciągle wyprzedzał czyli będziemy mieli w tym wypadku wyprzedzanie fazy prądu względem napięcia (na rys. 128 wykresy ciągłe). Dzięki temu że prąd wyładowania kondensatora będzie kierunku przeciwnego do kierunku prądu ze źródła, w obwodzie będziemy mieli mniejsze natężenie prądu niż w wypadku gdyby kondensatora w obwodzie nie było (na rys. wykres kreskowany).

Z tego wynika, że kondensator w obwodzie z prądem zmiennym pod względem swego wpływu na przesunięcie fazy natężenia prądu w stosunku do fazy napięcia odgrywa wręcz przeciwną rolę niż samoindukcja, chociaż tak samo stawia opór prądowi głównemu, zmniejszając jego natężenie.

Przy danem napięciu prądu  $V_t = V_m \sin \omega t$ , amplituda natężenia prądu:

$$J_m = \omega C V_m = \frac{V_m}{\frac{1}{\omega C}}$$

jest ona proporcjonalna do pojemności kondensatora i pulsacji prądu i przez analogję do wzoru  $J = \frac{V}{R}$ ,  $\frac{1}{\omega C}$  mierzymy w omach. Opór ten nazywamy opornością **pojemnościowa** albo **kapacytancją**. Jeżeli teraz uwzględnimy oporność omową obwodu, to rozumując jak w poprzednim rozdziale, możemy napisać że:

$$J = \frac{V}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}; \operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{R}$$

gdzie  $J$  i  $V$  — natężenie i napięcie skuteczne, a  $\varphi$  — wielkość kąta przesunięcia fazy.

Całkowity więc opór, który stawi w tym wypadku obwód dla prądu zmiennego będzie:

$$\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

Jeżeli wielkość kąta  $\varphi$  przesunięcia faz wynosi  $90^\circ$ , to w obwodzie będzie płynął prąd bezwattowy, t. j. energja elektryczna prądu ze źródła będzie przenosiła się do obwodu zewnętrznego i przekształcała się tam w energję pola elektrycznego zawartą w kondensatorze, a następnie wyładowujący się kondensator przekształci energję tego pola w energję prądu elektrycznego, który wróci zpowrotem do źródła prądu.

### Z a d a n i e.

Pomiędzy zaciskami źródła prądu zmiennego włączony jest kondensator o pojemności  $C=5$  mikrofaradów. Obliczyć skuteczną wartość natężenia prądu

w obwodzie oraz kąt przesunięcia fazy prądu względem napięcia, jeżeli różnica potencjałów na zaciskach źródła jest o skutecznej wartości 110 volt, a częstotliwość prądu  $f = 50$  okresów/sek (50~/sek.).

Pojemność kondensatora w faradach:

$$C = 5 \text{ mikrofarad} = \frac{5}{10^6} \text{ farad.}$$

Opór pojemnościowy obwodu:

$$\frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot \frac{5}{10^6}} = 636 \text{ omów}$$

skuteczna wartość natężenia prądu w obwodzie:

$$J = \frac{V}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{2\pi f C}\right)^2}} = \frac{110}{636} = 0,17 \text{ amp.}$$

kąt przesunięcia fazy prądu względem fazy napięcia:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{\omega C R} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot \frac{5}{10^6}} = \infty$$

skąd  $\varphi = 90^\circ$ , t. j. w obwodzie będzie płynął prąd bezwattowy.

**Wpływ pojemności i samoindukcji w obwodzie z prądem zmiennym.** Jeżeli w obwodzie z prądem zmiennym mamy włączony kondensator o pojemności  $C$  i szeregowo z nim cewkę o współczynniku samoindukcji  $L$  oraz opór omowy  $R$ , to wypadkowy opór który stawia ten obwód dla przepływającego po nim prądu nazywamy opornością **pozorną** albo **impedancją** (rys. 129). Oporność pojemnościowa stawiana

przez kondensator  $C$  będzie wywierała odmienny wpływ na przebieg prądu niż oporność indukcyjna cewki. Wielkość oporności pozornej określimy z następującego wzoru:

$$\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

Skuteczna wartość prądu przepływającego przez ten obwód będzie:

$$J = \frac{V}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

Tangens kąta przesunięcia fazy natężenia prądu względem napięcia:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$

Kąt  $\varphi$  może być dodatni lub ujemny. Gdy przeważa wpływ samoindukcji to  $\varphi$  jest dodatnie i napięcie wyprzedza natężenie prądu, gdy przeważa pojemność to  $\varphi$  jest ujemne i napięcie opóźnia się względem natężenia prądu (rys. 129 a i b).

**Rezonans. Wzór Thomsona.** Jak widzimy z powyższego wzoru, możemy tak dobrać oporności pojemnościową i indukcyjną, aby się one równoważyły. Zjawisko takie nazywamy **rezonans**em w obwodzie. Przy rezonansie napięcie będzie zgodne w fazie z natężeniem (oporność pojemnościowa opóźnia napięcie względem natężenia, a oporność indukcyjna opóźnia natężenie względem napięcia o tę samą wielkość); warunek rezonansu wymaga, aby:

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \text{ czyli}$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

stąd:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\text{ponieważ: } \omega = \frac{2\pi}{T},$$

$$\text{więc: } \frac{2\pi}{T} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ czyli } T = 2\pi \sqrt{LC}$$

gdzie  $T$  wyrażone w sekundach,  $L$ —w henry,  $C$ —w faradach.

Ostatni wzór nosi nazwę wzoru Thomsona i stanowi zasadę obliczeń radiotelegraficznych. Wzór Thomsona w jednostkach absolutnych wyrazi się:

$$\begin{aligned} T \text{ sek} &= 2\pi \sqrt{\frac{L}{10^9} \cdot \frac{C}{9 \cdot 10^{11}}} = \\ &= \frac{2\pi}{3 \cdot 10^{10}} \sqrt{L \text{ cm. samoind.} \cdot C \text{ cm. pojemn.}} \end{aligned}$$

W wypadku rezonansu skuteczna wartość natężenia w obwodzie będzie największa:

$$J = \frac{V}{R}; \text{ oraz } \varphi = 0$$

### Z a d a n i e.

Obliczyć przy jakiej częstotliwości prądu będzie zachodzić rezonans w obwodzie o oporności omowej  $R = 5$  omów, kiedy współczynnik samoindukcji tego obwodu  $L = 1,5$  henry i pojemność kondensatora

włączonego do obwodu  $C = 2$  mikrofarady, przy skutecznej wartości natężenia prądu w obwodzie  $J = 10$  amperów (rys. 129).

Częstotliwość prądu w wypadku rezonansu w obwodzie:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \cdot \sqrt{\frac{1}{1,5 \cdot 2 \cdot 10^{-6}}} = 368$$

oporność wypadkowa części obwodu  $AC$  będzie:

$$\sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2} = \sqrt{5^2 + 4 \cdot 3,14^2 \cdot 368^2 \cdot 1,5^2} = 865 \Omega$$

oporność pojemnościowa części obwodu  $CD$  będzie bardzo bliska do oporności części  $AC$  (wypadek rezonansu), gdyż oporność omowa  $R$  w porównaniu z opornością indukcyjną  $2\pi fL$  jest bardzo mała. Spadek napięcia na końcach obwodu  $AD$  będzie:

$$V_{AD} = 10 \cdot 5 = 50 \text{ volt.}$$

spadek napięcia na częściach obwodu  $BC$  oraz  $CD$  będzie:

$$V_{BC} = V_{CD} = 10 \cdot 865 = 8650 \text{ volt.}$$

Z tego przykładu widzimy jak ogromne znaczenie ma zjawisko rezonansu dla wielkości spadku napięcia w obwodzie prądu zmiennego z pojemnością i samoindukcją.

**Praktyczne zastosowanie zjawiska rezonansu.** Na zasadzie doprowadzenia oporności urojonej do 0, t. j. na dostrojeniu obwodu do rezonansu oparte jest zjawisko, którym każdy z nas bardzo często się zajmuje, a mianowicie strojenie stacji radjoodbiorczej.

Fala elektromagnetyczna, do której chcemy się dostroić posiada określoną długość  $\lambda = vT$ , gdzie  $v$  —

wielkość stała równa prędkości rozchodzenia się fal w eterze  $= 3 \cdot 10^8$  m/sek,  $T$ —wielkość okresu prądu szybkozmiennego w naszej antenie odbiorczej, wywołanego przez przejście przez nią fali. Jeżeli więc długość fali  $\lambda = 300$  m., to  $T = \frac{1}{10^6}$  sek., czyli czę-

stotliwość tego prądu będzie  $n = 10^6$ , t. j. milion okresów na sek. Antena wraz z włączonymi do niej kondensatorem i cewką posiada pewną pojemność  $C$  oraz indukcyjność  $L$ ; zmieniając te dwie wielkości, doprowadzamy oporność urojoną anteny do  $O$ , t. j.:

$$2\pi \cdot 10^6 L + \frac{1}{2\pi 10^6 C} = O,$$

wówczas prąd będzie miał do pokonania tylko oporność omową anteny i dzięki temu skuteczna jego wartość będzie największa i w słuchawce usłyszymy najsilniejsze impulsy.

Zdarzają się wypadki, że zapomocą pewnego radjoodbiornika nie można odebrać fali o pewnej długości, pomimo że zapomocą innych radjoodbiorników bez wzmacniaczy daje się to uskutecznić. Przyczyną tego zjawiska jest to, że granice zmienności  $L$  i  $C$  w danym odbiorniku i przy danej częstotliwości prądu w antenie uniemożliwiają dobranie takich wielkości  $L$  i  $C$ , aby opór urojony  $= 0$ . Należy wówczas zmienić albo  $L$  albo  $C$  albo też jedno i drugie przez włączenie dodatkowej cewki lub kondensatora.

Przy telefonowaniu na dalekie odległości w liniach telefonicznych stosuje się t. zw. pupinizację kabli, która polega na tem, że do linii są włączone dławiki o takim współczynniku samoindukcji, aby zrównana została oporność indukcyjna linii  $\omega L_l$  z jej opornością pojemnościową  $\frac{1}{\omega C_l}$ . Zapomocą więc pupinizacji oporność uro-



joną linii sprowadzamy do 0 i prąd płynący po liniach telefonicznych będzie miał do pokonania jedynie oporność omową  $R_l$ .

### Praktyczne zastosowanie pojemności i samoindukcji w obwodach z prądem stałym i zmiennym.

Jeżeli w obwodach płyną prądy stałe i zmienne, to ze względu na włączone do obwodu przyrządy, z których jedne mogą być przeznaczone tylko dla prądu stałego, a drugie dla prądu zmiennego, zachodzi potrzeba oddzielania prądu stałego od zmiennego. W tych wypadkach korzystamy z własności kondensatora i dławika, pozwalających na oddzielenie od siebie tych prądów, kondensator i dławik w tym wypadku odgrywają rolę filtrów prądu.

Tak więc prądowi zmiennemu o dużej częstotliwości  $f$  dławik będzie stawiał dużą oporność ( $2 \pi f L$ ) tym większą im większe będzie  $L$ , a kondensator —

małą  $\left(\frac{1}{2 \pi f C}\right)$  i to tem mniejszą im większa będzie

jego pojemność.

Prądowi stałemu ( $f = 0$ ) dławik stawia oporność tylko omową, gdyż jego oporność indukcyjna  $2 \pi f L = 0$ , prócz oporności indukcyjnej w chwili zamknięcia i otwarcia obwodu, kiedy powstają ekstraprądy zamknięcia i otwarcia.

Prądowi stałemu kondensator stawia opór  $\frac{1}{2 \pi f c} = \infty$ ,

czyli kondensator w obwodzie prądu stałego jest kompletną tamą, prócz chwili zamknięcia i otwarcia obwodu prądu stałego, kiedy prąd przejdzie po obu częściach obwodu rozdzielonych kondensatorem.

Jeżeli w jakimkolwiek obwodzie mamy kilka różnych napięć, to jak wiemy wypadkowe napięcie w każdym

momencie otrzymamy przez algebraiczne dodanie wszystkich napięć istniejących w danym momencie w tym obwodzie.

Gdy mamy w obwodzie tylko dwa napięcia: zmienne i stałe, których wykresy kreskowane są pokazane na rys. 130, to wypadkowe napięcie, pokazane na tym rysunku zapomocą wykresów ciągłych, otrzymamy dla każdego wypadku następujące:

a) kiedy amplituda napięcia zmiennego będzie mniejsza od napięcia stałego (rys. 130a), to wypadkowe napięcie będzie pulsującym;

b) kiedy amplituda napięcia zmiennego jest równa napięciu stałemu, to wypadkowe napięcie będzie pulsującym ale przerywanem, t. j. w pewnych momentach napięcie będzie równe 0 (rys. 130b).

c) kiedy amplituda napięcia zmiennego jest większa od napięcia stałego (rys. 130c), to wypadkowe napięcie będzie napięciem zmiennem.

Z tego widzimy, że każdy prąd pulsujący i przerywany możemy przedstawić jako prąd wywołany wypadkowym napięciem dwóch napięć składowych, z których jedno jest zmienne drugie stałe.

Na rys. 131 przedstawione jest włączenie kondensatora  $C$  i dławika  $L$  do obwodu prądu pulsującego wytworzonego przez prądnicę  $A$ , prąd pulsujący zostanie wówczas rozłożony w poszczególnych gałęziach w następujący sposób: w gałęzi  $B A D$  popłynie prąd pulsujący wytworzony przez prądnicę  $A$ ; w gałęzi  $B D$  przez kondensator  $C$  popłynie tylko składowy prąd zmienny, gdyż dławik  $L$  będzie stawiał temu prądowi dużą oporność; w gałęzi  $E F$  przez dławik  $L$  popłynie tylko składowy prąd stały, którego nie przepuści zupełnie kondensator  $C$ .

Podobny układ kondensatora i dławika spotykamy na każdej stacji telegraficznej i telefonicznej przy

równoczesnem wykorzystaniu linii jedнопrzewodowej lub dwuprzewodowej (rys. 132) dla telegrafowania i telefonowania. Na jednej stacji mamy telefon  $T$  i telegraf  $M$ , na drugiej telefon  $T_1$  i telegraf  $M_1$ . Ponieważ telefony pracują prądem zmiennym, a telegrafy prądem stałym, wobec tego do obwodu telefonu włączamy kondensatory  $C$  i  $C_1$ , dla niedopuszczenia do nich prądu stałego, natomiast do obwodu telegrafów włączamy dławiki  $L$  i  $L_1$  dla niedopuszczenia do nich prądu zmiennego; przy nadawaniu na aparatach telegraficznych będziemy zamykali i otwierali obwód prądu stałego, czyli w rzeczywistości w obwodzie telegrafów  $M$  i  $M_1$  będziemy mieli prąd pulsujący przerywany, którego składowy prąd zmienny będzie przechodził przez kondensatory  $C$  i  $C_1$ . Wskutek tego w telefonach  $T$  i  $T_1$  będziemy słyszeli w chwili zamykania i otwierania prądu w aparatach telegraficznych krótkie uderzenia, przyczem przy otwieraniu uderzenia te będą silniejsze przy zamykaniu słabsze, a to z powodu silnego ekstraprądu spowodowanego dławikami  $L$  i  $L_1$ . Te uderzenia do pewnego stopnia będą przeszkadzały rozmowom telefonicznym, lecz nie uniemożliwiały ich.

Podobne stosowanie kondensatorów i dławików jako filtrów spotykamy w radjoodbiornikach. Na rysunku 133-im przedstawiony jest t. zw. odbiornik detektorowy, w którym dzięki detektorowi  $D$  drgania szybkozmienne zostają wyprostowane co do kierunku — ściślej mówiąc amplitudy jednego kierunku zostają przez detektor silnie stłumione. Dzięki równoległemu włączeniu słuchawki telefonicznej  $T$ , odgrywającej rolę dławika, oraz kondensatora  $C$  zwanego kondensatorem blokującym, prąd jednokierunkowy szybkozmienny rozdzieli się na dwie części składowe: prąd stały popłynie przez słuchawkę  $T$ , prąd zmienny — przez kondensator blokujący  $C$ . Wobec tego w czasie jednego

ciągu drgań, niezależnie od ich częstotliwości, w słuchawce otrzymamy tylko jeden impuls prądu, który wywołała tylko jedno drgnięcie membramy telefonicznej, czyli ilość drgań membramy (ton odebranych w słuchawce dźwięków) będzie dzięki temu zależała jedynie od ilości ciągów tych drgań, a nie od częstotliwości drgań podczas jednego ciągu, t. j. od długości fali odbieranej.

Również w aparatach telefonicznych spotykamy kondensatory i dławiki w roli filtrów prądów. Jedno z takich urządzeń ilustruje rys. 134. Do zacisków linjowych  $Z$  i  $Z_1$  włączony jest równolegle dzwonek sygnałowy, którego uzwojenie elektromagnesów posiada duży współczynnik samoindukcji  $L$  i telefon  $T$ , którego uzwojenie elektromagnesów posiada o wiele mniejszy współczynnik samoindukcji  $L_1$  ( $L \gg L_1$ ). Do obwodu telefonu szeregowo jest włączony kondensator  $C$  o małej pojemności (od 0,1 do 0,5 mikroforada). Jeżeli do zacisków linjowych przyjdzie prąd induktora stacji przeciwnej, o częstotliwości 10 — 15 okresów na sek., to prawie cały ten prąd przejdzie przez dzwonek, ponieważ kondensator przy małej swej pojemności i małej częstotliwości prądu będzie stawiał temu prą-

dowi dużą oporność  $\left(\frac{1}{2\pi fc}\right)$ . W telefonie w tym wypadku usłyszymy tylko słaby szum. Natomiast, kiedy do zacisków linjowych przyjdzie prąd mówniczy o dużej częstotliwości 800 — 1000 okresów na sek., to prawie cały ten prąd przejdzie przez kondensator i telefon, ponieważ przy dużej częstotliwości prądu i dużym współczynniku samoindukcji uzwojenie dzwonka będzie stawiało temu prądowi dużą oporność  $(2\pi fL)$ .

Kiedy chcemy mieć napięcie jaknajwięcej zbliżone do napięcia stałego, osiągamy to również przy stosowaniu kondensatorów i dławików jako filtrów prądu.

Na rys. 135-ym przedstawiony jest prostownik neonowy, który przetwarza prąd zmienny, wytwarzany przez prądnicę  $A$ , na prąd pulsujący przerywany (wykres ciągły na rys. 130b). Jeżeli teraz do zacisków  $c$   $d$  włączymy równolegle kondensator  $C$  i szeregowo dławik  $L$ , wówczas na zaciskach  $c$   $d$  będziemy mieli stałe napięcie, gdyż składowe napięcie zmienne (rys. 130b) będzie krótkozwarte przez kondensator  $C$ . Kondensatory stosowane w takich układach nazywamy **kondensatorami wyrównawczymi**.

**Wzajemna indukcja. Obwody sprzężone.** Dzięki indukcji elektromagnetycznej możemy przenosić energię elektryczną z jednego obwodu do drugiego w następujący sposób (rys. 136). W obwodzie I o współczynniku samoindukcji  $L_1$  jest włączona bateria ogniw  $E$  oraz klucz  $K$ , zapomocą którego obwód zamykamy lub otwieramy; w obwodzie II o współczynniku samoindukcji  $L_2$ , znajdującym się w pewnej odległości od obwodu I, jest włączony galwanometr  $G$ .

Jeżeli zamkniemy obwód I zapomocą klucza  $K$ , to, dzięki ekstraprądowi zamknięcia, prąd w tym obwodzie będzie wzrastał według krzywej  $O A$  (rys. 137). Równocześnie według tej samej krzywej (tylko przedstawionej w skali  $L_1$  razy mniejszej) będzie wzrastał strumień magnetyczny przenikający ten obwód. Po upływie czasu  $t_1 = OF$  natężenie prądu w obwodzie I dojdzie do swej normalnej wartości:  $J_1 = \frac{E}{R}$ , a stru-

mień magnetyczny do wartości  $\Phi_1 = L_1 J_1$ . Wielkość natężenia prądu  $J_1$  w obwodzie I oraz wielkość strumienia magnetycznego  $\Phi_1$ , przenikającego ten obwód, będzie niezmienną podczas całego czasu  $t_2 = FG$ .

Pewną część strumienia  $\Phi_1$  równa  $\Phi_1'$  będzie przecinała również obwód II. Zmiana strumienia magnetycznego  $\Phi_1$  wywoła zmianę strumienia  $\Phi_1'$ ; wobec

tego w obwodzie II powstanie elektromotoryczna siła indukcji, która wywoła w tym obwodzie prąd indukcyjny, dzięki czemu wskazówka galwanometru  $G$  odchyli się. Odchylenie galwanometru  $G$  będziemy obserwować tylko po zamknięciu obwodu I w przeciagu czasu  $t_1 = OF$ . Kierunek prądu indukcyjnego w obwodzie II, według prawa Makswela, będzie przeciwny niż w obwodzie I-ym; prąd indukcyjny będzie dążył do zniesienia zmiany strumienia magnetycznego obwodu I-go. Przebieg natężenia prądu w obwodzie II jest przedstawiony na rys. 137 linią kreskowaną pod osią odciętych. Jeżeli po upływie czasu  $t_2 = FG$  otworzymy obwód I, to powstanie w nim ekstraprąd otwarcia, którego przebieg wskazuje krzywa  $BD$ . Analogiczny przebieg będzie miał i strumień magnetyczny  $\Phi_1$ , który tak samo jak i prąd po upływie czasu  $t_3 = GD$  osiągnie wartość 0. Jednocześnie zacznie znikać strumień magnetyczny  $\Phi_1'$ , przenikający obwód II, wskutek czego w obwodzie tym powstanie prąd indukcyjny o kierunku przeciwnym i o natężeniu większym, niż przy zamykaniu obwodu I. Przebieg prądu otwarcia w obwodzie II jest przedstawiony na rys. 137 linią kreskowaną nad osią odciętych. Ekstraprąd otwarcia będzie trwał dużo krócej niż ekstraprąd zamknięcia i krzywa narastania prądu  $OA$  będzie mniej stroma niż krzywa opadania  $BD$ . Przy otwieraniu obwodu I, dzięki prądowi indukcyjnemu w obwodzie II, igła galwanometru odchyli się ponownie, lecz w kierunku przeciwnym i o większy kąt niż poprzednio. Największą wartość prąd indukcyjny w obwodzie II będzie posiadał w chwili najszybszej zmiany przenikającego strumienia magnetycznego  $\Phi_1'$ , a więc w chwili najszybszej zmiany natężenia prądu w obwodzie I; odpowiadające tym zmianom wykresy  $OA$  i  $BD$  będą wówczas najbardziej strome (nastąpi to w połowie czasu  $t_1$  i  $t_3$ ).

Widzimy z tego, że, dzięki zmianom natężenia prądu w obwodzie I, wywołujemy prąd indukcyjny w obwodzie II czyli przenosimy energję elektryczną z jednego obwodu do drugiego. Obwód I jest w tym wypadku **obwodem indukującym** lub **magnesującym**, obwód II — **indukowanym** lub **magnesowanym**. Takie dwa obwody nazywamy **sprężonemi**, a system sprężenia wyżej rozpatrzony **sprężeniem indukcyjnem** lub **transformatorowem**. Przy przenoszeniu energii elektrycznej z jednego obwodu do drugiego, prócz systemu sprężenia indukcyjnego, stosujemy jeszcze inne systemy sprężenia obwodów, które rozpatrzemy poniżej.

**Spółczynnik indukcji wzajemnej** lub **indukcyjność wzajemna**. **Spółczynnik sprężenia**. Wielkość strumienia magnetycznego  $\Phi_1$ , wytworzonego przez prąd  $J_1$  w obwodzie I, jest proporcjonalna do tego prądu:  $\Phi_1 = L_1 J_1$ , przyczem współczynnik proporcjonalności zależy tylko od własności tego obwodu i ośrodka. Część tego strumienia —  $\Phi_1'$ , przenikająca obwód II, będzie też proporcjonalna do prądu  $J_1$ :  $\Phi_1' = M_1 J_1$ , ale w tym wypadku współczynnik proporcjonalności  $M_1$ , zwany **spółczynnikiem indukcji wzajemnej** lub **indukcyjnością wzajemną**, zależy nietylko od własności samych obwodów i ośrodka, ale także od ich wzajemnego położenia względem siebie. Ze względu na analogię do współczynnika samoindukcji  $L$ , wielkość współczynnika indukcji wzajemnej  $M$  mierzy się w tych samych jednostkach t. j. centymetrach lub **henry**. Przypuśćmy teraz, że źródło prądu załączone zostało do obwodu II, to płynący w tym obwodzie prąd o natężeniu  $J_2$ , wywoła strumień magnetyczny  $\Phi_2 = L_2 J_2$ , przyczem część tego strumienia  $\Phi_2' = M_2 J_2$  przetnie także obwód I. Łatwo

dowieść, że współczynnik indukcji wzajemnej jest w obu wypadkach jednakowy, t. j.  $M_1 = M_2$ .

W tym celu przypuśćmy, że w jednym obwodzie płynie prąd stały  $J_1$  i wytwarza strumień magnetyczny  $\Phi_1$ , część jego przecinająca obwód II równa się:  $\Phi_1' = M_1 J_1$ , w drugim obwodzie płynie prąd stały  $J_2$ ; odpowiednio strumień magnetyczny przecinający obwód I równa się  $\Phi_2' = M_2 J_2$ . Usuńmy teraz obwód II do nieskończoności; w tym położeniu żadna z linii strumienia  $\Phi_1'$  nie będzie go przecinać; praca wykonana przy tym przesunięciu będzie równa:  $A_1 = \Phi_1' J_2 = M_1 J_1 J_2$ .

Zamiast obwodu II, możemy jednak usunąć obwód I do nieskończoności, wykonamy przy tem pracę:  $A_2 = \Phi_2' J_1 = M_2 J_2 J_1$ . Ale prace przy usuwaniu tych obwodów od siebie do nieskończoności muszą być równe czyli:  $A_1 = A_2$ , a więc:  $M_1 J_1 J_2 = M_2 J_2 J_1$ , a stąd  $M_1 = M_2 = M$ .

Z tego widzimy, że współczynnik indukcji wzajemnej dwóch obwodów sprzężonych określa zarówno wpływ obwodu I na II jak i II na I.

Praktyczną jednostkę współczynnika indukcji wzajemnej określamy w następujący sposób: współczynnik indukcji wzajemnej dwóch sprzężonych obwodów posiada wartość 1 henry, jeżeli zmiana natężenia prądu o 1 amper na 1 sek. w jednym z tych obwodów wywoła w drugim elektromotoryczną siłę indukcji równą 1 volt.

Współczynnik indukcji wzajemnej możemy jeszcze określić w inny sposób. Oznaczmy strumienie magnetyczne, wytworzone przez prąd w jednym z obwodów, a przenikające drugi, odpowiednio przez  $\Phi_1'$  i  $\Phi_2'$ . Strumienie te są proporcjonalne do całkowitych strumieni  $\Phi_1$  i  $\Phi_2$ , gdyż stanowią pewną ich część:  $\Phi_1' = k_1 \Phi_1 = k_1 L_1 J_1$ ;  $\Phi_2' = k_2 \Phi_2 = k_2 L_2 J_2$ . Ale



z drugiej strony:  $\Phi_1' = MJ_1$  i  $\Phi_2' = MJ_2$ , więc:  $MJ_1 = k_1 L_1 J_1$ ;  $MJ_2 = k_2 L_2 J_2$ , czyli  $M = k_1 L_1$  i  $M = k_2 L_2$ . Mnożąc przez siebie stronami ostatnie dwie równości, otrzymamy:  $M^2 = k_1 k_2 L_1 L_2$ . Oznaczmy stały czynnik  $k_1 k_2$  przez  $K^2$ , to:  $M^2 = K^2 L_1 L_2$ , a stąd  $K = M \sqrt{L_1 L_2}$ . Spółczynnik  $K$  nazywamy **spółczynnikiem sprzężenia**.

Jeżeli ustawimy oba obwody w ten sposób, żeby cały strumień magnetyczny  $\Phi$ , wytworzony przez prąd płynący w jednym z nich, przenikał przez drugi, co w przybliżeniu może mieć miejsce wówczas, gdy uzwojenia obu obwodów są nawinięte na wspólnym rdzeniu lub jedno z nich znajduje się całkowicie wewnątrz drugiego, to współczynnik indukcji wzajemnej tak sprzężonych obwodów posiada wartość największą.

Mówimy, że tak sprzężone obwody posiadają największy współczynnik sprzężenia. Współczynnik ten wyrażamy w procentach, obliczając go z następującego wzoru:

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}} \cdot 100\%$$

z tego wzoru widzimy, że współczynnik sprzężenia  $K$  możemy zmieniać dla danych obwodów w szerokich granicach zapomocą zmiany: a) współczynników samoindukcji  $L_1$  i  $L_2$  każdego obwodu, b) wzajemnego położenia względem siebie obwodów, c) wstawienia wewnątrz uzwojeń każdego obwodu rdzeni żelaznych, albo d) umieszczenie rdzeni żelaznych w pobliżu uzwojeń każdego obwodu.

Jeżeli uzwojenia dwóch obwodów sprzężonych, nawinięte na jednym rdzeniu, będą posiadały jednakowe współczynniki samoindukcji  $L_1 = L_2$ , to współczynnik ich wzajemnej indukcji będzie:  $M \cong L_1 \cong L_2$ , a współczynnik sprzężenia:  $K \cong 100\%$ .

Zależnie od kierunku prądu zasilającego obwód I i od kierunku prądu indukcyjnego, przepływającego przez obwód II (rys. 136), współczynnik indukcji wzajemnej  $M$  może być dodatni lub ujemny, t. j. może być:  $M > 0$  lub  $M < 0$ .

Współczynnik indukcji wzajemnej  $M > 0$ , gdy kierunek nawinięcia uzwojeń obu obwodów sprzężonych jest jednakowy (rys. 138a). W tym wypadku kierunki elektromotorycznych sił w poszczególnych zwojach obu uzwojeń będą zgodne. Natomiast kierunki wypadkowych sił elektromotorycznych  $E_1$  i  $E_2$ , a więc i kierunki prądów w obwodach I i II, będą przeciwne.

Wobec tego strumień magnetyczny wywołany przez prąd indukcyjny płynący w obwodzie II będzie kierunku przeciwnego niż strumień wywołany w obwodzie I przez prąd zasilający ten obwód ze źródła prądu. Na takim przeciwdziałaniu dwóch strumieni magnetycznych wytworzonych przez uzwojenia obwodu I i II polega właśnie praca transformatorów.

Współczynnik indukcji wzajemnej  $M < 0$ , gdy kierunek nawinięcia uzwojeń obu obwodów jest przeciwny (rys. 138 b.). W tym wypadku kierunki elektromotorycznych sił w poszczególnych zwojach obu uzwojeń będą przeciwne, natomiast kierunki wypadkowych sił elektromotorycznych  $E_1$  i  $E_2$ , a więc i kierunki prądu w obwodach I i II, będą zgodne. Wobec tego kierunek strumieni magnetycznych wywołanych dokoła obwodu I i II będzie zgodny (odwrotnie niż w transformatorach).

**Systemy sprzężenia obwodów.** Rozróżniamy cztery systemy sprzężenia obwodów:

- a) sprzężenie indukcyjne czyli transformatorowe,
- b) sprzężenie autotransformatorowe,

- c) sprzężenie pojemnościowe,
- d) „ oporowe.

a) **Sprzężenie indukcyjne** czyli transformatorowe rozpatrzyliśmy już poprzednio na rys. 136. Mieliliśmy jednak wówczas w obwodzie I źródło prądu stałego, a zjawisko indukcji zachodziło tylko w chwili zamykania i otwierania prądu w tym obwodzie (rys. 137). W praktyce mamy w obwodzie I źródło prądu zmiennego  $A$  (rys. 139); prąd zmienny powoduje powstawanie dokoła obwodu I zmiennego strumienia magnetycznego o tej samej częstotliwości, co i prąd zasilający ten obwód ze źródła  $A$ . Ten zmienny strumień magnetyczny, przenikając obwód I, wywołuje w nim prąd indukcyjny zmienny o tej samej częstotliwości, jaką posiada prąd zasilający obwód I. Powstaający w obwodzie II prąd indukcyjny zasila włączony odbiornik prądu  $B$ .

b) **Sprzężenie autotransformatorowe** (rys. 140). polega na tem, że część uzwojenia  $L_1$  obwodu I, równa  $L_2$  stanowi jednocześnie uzwojenie obwodu II, przyczem wielkość współczynnika samoindukcji  $L_2$  obwodu II, podobnie jak w warjometrze, można zmieniać zapomocą 2-ch kontaktów ślizgowych. Zmieniając wielkość współczynnika samoindukcji  $L_2$  obwodu II, otrzymamy większy lub mniejszy prąd indukcyjny w obwodzie II o tej samej częstotliwości, co prądu zmiennego zasilającego obwód I.

c) **Sprzężenie pojemnościowe** (rys. 141) polega na tem, że w obwodzie I są włączone szeregowo kondensatory  $C_1$  i  $C_2$ , przyczem kondensator  $C_2$  wchodzi jednocześnie w skład obwodu II. W ten sposób kondensator  $C_2$ , wyładowując się, będzie zasilał prądem odbiornik  $B$  włączony do obwodu II.

Niekiedy sprzężenie pojemnościowe jest uskutecznione w ten sposób, że okładki kondensatora włączonego do obwodu II są luźno umieszczone wewnątrz okładek kondensatora włączonego do obwodu I. Wówczas kondensator obwodu II będzie się znajdował w polu elektrycznym kondensatora obwodu I; dzięki indukcji elektrostatycznej przy ładowaniu i wyładowywaniu kondensatora obwodu I będzie następować ładowanie i wyładowywanie kondensatora obwodu II, wskutek tego w obwodzie tym będzie płynął prąd zmienny o tej samej częstotliwości, co i prąd zmienny zasilający obwód I.

d) **Sprzężenie oporowe** (rys. 142) polega na tem, że w obwodzie I jest włączony opór omowy  $R_1$ , którego część  $R_2$  wchodzi jednocześnie w skład obwodu II. Wielkość oporności omowej  $R_2$  może być zmieniana za pomocą 2-ch kontaktów ślizgających się po zwojach oporu  $R_1$ . Zmieniając wielkość oporności  $R_2$ , będziemy w ten sposób zwiększali lub zmniejszali napięcie pomiędzy dwoma ślizgającymi się kontaktami, stanowiącymi jakby zaciski źródła prądu zmiennego zasilającego obwód II. Zaznaczyć należy, że sprzężenie oporowe jest jedynem sprzężeniem stosowanym przy prądzie stałym.

**Prąd trójfazowy.** Dotychczas mówiliśmy o prądzie zmiennym jednofazowym, wytwarzanym przy wirowaniu pojedynczego uzwojenia w polu magnetycznym. Prąd taki rzadko się używa, częściej natomiast jest używany w przemyśle t. zw. **prąd zmienny trójfazowy**, powstający przy wirowaniu w polu magnetycznym trzech jednakowych, niezależnych od siebie uzwojeń, przesuniętych względem siebie o kąt  $120^\circ$  (rys. 143). W uzwojeniach takich przy wirowaniu będą powstawać elektromotoryczne siły indukcji

o jednakowym okresie i jednakowej wartości skutecznej, lecz o fazach przesuniętych względem siebie o  $1/3$  okresu czyli o  $120^\circ$ . Jeżeli do końcówek tych uzwojeń dołączymy trzy niezależne obwody zewnętrzne o jednakowych odbiornikach, to prądy zmienne jednofazowe, powstające w każdym z tych obwodów, będą o jednakowym okresie, jednakowej wartości skutecznego natężenia, lecz o fazach przesuniętych względem siebie również o  $120^\circ$ . Z wykresu (rys. 144) widzimy, że algebraiczna suma natężeń prądów we wszystkich fazach jest w każdej chwili równa zeru:  $i_{1t} + i_{2t} + i_{3t} = 0$ . Jeżeli bowiem w I fazie natężenie osiągnęło wartość maksymalną:  $i_{1t} = J_m \sin 90^\circ = J_m$ , to w II:  $i_{2t} = J_m \sin (90^\circ + 120^\circ) = J_m \sin 210^\circ = J_m \sin (180^\circ + 30^\circ) = -J_m \sin 30^\circ = -\frac{1}{2} J_m$ , a w III:  $i_{3t} = J_m \sin (210^\circ + 120^\circ) = J_m \sin 330^\circ = J_m \sin (270^\circ + 60^\circ) = -J_m \cos 60^\circ = -J_m \sin 30^\circ = -\frac{1}{2} J_m$ , a więc  $i_{1t} + i_{2t} + i_{3t} = 0$ .

To samo dotyczy wartości skutecznych prądów, ponieważ są one zależne w jednakowym stopniu od

wartości maksymalnych:  $J_{sk} = \frac{J_m}{\sqrt{2}}$ . Przedstawmy

wartości natężeń skutecznych prądów w poszczególnych fazach zapomocą trzech wektorów:  $J_1, J_2, J_3$ , przesuniętych względem siebie o  $120^\circ$ .

Sumowanie wektorów uskuteczniamy geometrycznie; w tym celu należy z końca jednego wektora wykreślić wektor równy i równoległy do drugiego, a z jego końca — wektor równy i równoległy do trzeciego (rys. 144a). Ponieważ suma tych wektorów ma być

równa zero, więc muszą one tworzyć obwód zamknięty, gdyż tylko w tym wypadku suma rzutów dwóch wektorów na kierunek trzeciego będzie równa temu ostatniemu wektorowi. Z wykresu na rys. 144 widzimy, że jeżeli w pewnym uzwojeniu prąd płynie w jednym kierunku, to w pozostałych dwóch — w kierunku przeciwnym. To samo odnosi się i do przewodów. Jeżeli w jednym przewodzie prąd płynie do odbiornika, to w pozostałych dwóch — od odbiornika do źródła prądu (rys. 144b).

Analogicznie do zmiany natężeń prądu odbywa się zmiana napięć w poszczególnych fazach, otrzymamy więc dla nich wykres podobny, jak na rys. 144. Jeżeli wszystkie odbiorniki, włączone do poszczególnych faz są zupełnie jednakowe, to wartości czynne czyli skuteczne napięć będą jednakowe we wszystkich fazach i przesunięte względem siebie o  $120^{\circ}$ . Korzystając z tego, że suma natężeń prądów we wszystkich fazach jest w każdej chwili równa zero, możemy początki uzwojeń połączyć ze sobą i przez to zredukować ilość przewodników odprowadzających prąd do trzech.

Połączenia takie bywają 2-ch rodzaj: w gwiazdę i w trójkąt.

**Połączenie w gwiazdę** czyli połączenie równoległe pomiędzy sobą uzwojeń I, II i III polega na tem, że początki uzwojeń łączymy w jednym punkcie  $O$  (rys. 145), a końce przyłączamy do 3-ch pierścieni (rys. 145 a), po których ślizgają się szczotki odprowadzające za pomocą trzech przewodów prąd do obwodu zewnętrznego. Końce przewodów odbiorników łączymy również w jednym punkcie  $O'$ . Natężenie prądu w każdym przewodzie będzie równe w tym wypadku natężeniu w poszczególnych uzwojeniach.

Napięcie pomiędzy każdymi dwoma przewodami czyli t. zw. **napięcie międzyprzewodowe**, wywołane siłami elektromotorycznymi 2-ch połączonych w szereg uzwojeń, ze względu na przesunięcie faz, nie będzie równe podwójnemu napięciu na zaciskach jednej fazy, a nieco mniejsze.

Oznaczmy zmienne potencjały w punktach  $A, O, B$  (rys. 145 b), w pewnej chwili, odpowiednio przez  $V_A, V_0, V_B$ . Napięcie na końcówkach pierwszej fazy wyniesie wówczas:  $V_1 = V_A - V_0$ ; na końcówkach drugiej fazy:  $V_2 = V_B - V_0$ . Napięcie pomiędzy końcówkami  $A$  i  $B$  czyli pomiędzy I i II fazą wynosi:  $V_{1,2} = V_A - V_B = V_A - V_0 - (V_B - V_0) = V_1 - V_2$ . Widzimy więc, że aby znaleźć napięcie między pierwszą i drugą fazą, należy odjąć od siebie geometrycznie wektory wyrażające napięcia w tych fazach (wektory wyrażające napięcia są przesunięte względem siebie o  $120^\circ$ , więc nie można sumować algebraicznie ich wartości). Odjąć wektor  $V_2$  jest to samo, co dodać wektor znaku przeciwnego t. j.  $-V_2$  (rys. 145 c). Otrzymamy więc:  $V_{1,2} = V_1 \cos 30^\circ + V_2 \cos 30^\circ =$

$$(V_1 + V_2) \cos 30^\circ = (V_1 + V_2) \cdot \frac{\sqrt{3}}{2};$$

a ponieważ co do wartości liczbowej  $V_1 = V_2 = V$ ; więc:

$$V_{1,2} = 2V_1 \frac{\sqrt{3}}{2} = V_1 \sqrt{3} = V_2 \sqrt{3} = V \sqrt{3} =$$

1,73  $V$ , gdzie  $V$  — napięcie w poszczególnych fazach.

Jeżeli np. napięcie na końcówkach uzwojeń poszczególnych faz wynosi 120 v., to napięcie międzyprzewodowe będzie:

$$V_{1,2} = 1,73 \cdot 120 = 207,5 \text{ voltów.}$$

Czasem przy tem połączeniu odprowadzamy jeszcze od punktu  $O$  4-ty przewód, t. zw. zerowy; możemy

wówczas korzystać z 2-ch napięć: fazowego, wynoszącego jak w powyższym przykładzie 120 volt pomiędzy każdym z przewodów fazowych i przewodem zerowym i międzyprzewodowego, wynoszącego 207,5 v.

**Połączenie w trójkąt** czyli szeregowe polega na tem, że jeżeli połączymy koniec jednego uzwojenia z początkiem drugiego, to otrzymamy jakby zamknięty obwód (rys. 146), a przewody doprowadzające prąd do trzech pierścieni będą jakby odgałęzieniami od trzech symetrycznie rozmieszczonych punktów tego obwodu  $k, l, n$ , znajdujących się jeden od drugiego pod kątem  $120^\circ$ . Przy połączeniu w trójkąt uzwojeń w obwodzie zewnętrznym po każdym przewodzie będzie płynął prąd o natężeniu 1,73 razy większym niż w poszczególnych zwojach, gdyż na każdy prąd w przewodzie składają się po 2 prądy uzwojenia przesunięte w fazie, przyczem, jak widać z rys. 146 b, aby otrzymać prąd w I przewodzie  $i_1$ , należy od prądu fazowego  $J_1$  odjąć prąd  $J_2$ , a ponieważ są one przesunięte względem siebie, więc odejmowanie należy skutecznie geometrycznie, w tym celu należy do wektora  $J_1$  dodać wektor przeciwnie skierowany niż  $J_2$ , czyli dodać  $-J_2$  (rys. 146 c). Wówczas otrzymamy, analogicznie jak przy odejmowaniu napięć przy poprzednim połączeniu, że:  $i_1 = J_1 \cos 30^\circ + J_2 \cos 30^\circ = J \sqrt{3} = 1,73 J$ .

Przy połączeniu odbiorników  $D, F, G$  pomiędzy sobą również w trójkąt, otrzymamy, na mocy I prawa Kirchhowa, w odbiornikach prąd o takim natężeniu, jakby każdy z nich był włączony oddzielnie do odpowiednich obwodów uzwojeń I, II, III, należy przytem dbać, aby wszystkie trzy fazy były jednakowo obciążone.

Napięcie pomiędzy przewodami będzie w tym wypadku takie, jak i napięcie na końcach każdego uzwo-



jenia. W obwodzie zamkniętym  $A, B, C$  (rys. 146) prąd wewnętrzny powstać nie może, ponieważ siły elektromotoryczne w uzwojeniach są przesunięte w fazie o trzecią część okresu i nigdy się nie zdarzy, aby wszystkie wywoływały prąd w jednym kierunku. Prąd może płynąć tylko od jednego przewodu do drugiego.

**Moc prądu trójfazowego.** Jak widzieliśmy, przy rozpatrywaniu prądu jednofazowego, moc prądu zmiennego jest stale dodatnia, gdy prąd i napięcie są zgodne w fazie; gdy prąd wyprzedza lub też opóźnia się względem napięcia, moc prądu przybiera wartości dodatnie i ujemne (rys. 116). W tym ostatnim wypadku odbiornik staje się w pewnych chwilach źródłem prądu. (Może to zachodzić w obwodach o dużym współczynniku samoindukcji lub o dużej pojemności). Moc prądu zmiennego w dowolnej chwili:  $P_t = V_t \cdot J_t$ . Nas interesuje średnia moc za pewien przeciąg czasu. Załóżmy dla ogólności rozważań, że prąd spóźnia się w fazie względem napięcia o kąt  $\varphi$ . Wówczas:

$$V_t = V_{max} \sin \frac{2\pi}{T} t; J_t = J_{max} \sin \left( \frac{2\pi}{T} t - \varphi \right). \quad \text{Moc}$$

$$\text{w chwili } t: P_t = V_{max} J_{max} \sin \frac{2\pi}{T} t \cdot \sin \left( \frac{2\pi}{T} t - \varphi \right).$$

$$\text{Przekształćmy iloczyn sinusów: } \sin \frac{2\pi}{T} t \cdot \sin \left( \frac{2\pi}{T} t - \varphi \right) =$$

$$= \sin \frac{2\pi}{T} t \left[ \sin \frac{2\pi}{T} t \cdot \cos \varphi - \cos \frac{2\pi}{T} t \cdot \sin \varphi \right] =$$

$$= \sin^2 \frac{2\pi}{T} t \cdot \cos \varphi - \sin \frac{2\pi}{T} t \cdot \cos \frac{2\pi}{T} t \cdot \sin \varphi =$$

$$= \frac{1}{2} \cos \varphi - \frac{1}{2} \cos \frac{4\pi}{T} t \cdot \cos \varphi - \frac{1}{2} \sin \frac{4\pi}{T} t \cdot \sin \varphi,$$

$$\text{gdyż: } \sin^2 \frac{2\pi}{T} t = \frac{1}{2} \left( 1 - \cos \frac{4\pi}{T} t \right) \text{ i } \sin \frac{2\pi}{T} t \cdot \cos \frac{2\pi}{T} t = \\ = \frac{1}{2} \sin \frac{4\pi}{T} t. \text{ Po podstawieniu do wzoru na moc,}$$

otrzymamy:

$$P_t = \frac{1}{2} V_{max} \cdot J_{max} \cdot \cos \varphi - \frac{1}{2} V_{max} \cdot J_{max} \cdot \cos \varphi \cdot$$

$$\cos \frac{4\pi}{T} t - \frac{1}{2} V_{max} \cdot J_{max} \cdot \sin \varphi \cdot \sin \frac{4\pi}{T} t. \text{ Pierwszy z tych}$$

wyrazów jest wielkością stałą, gdyż zakładamy, że  $\varphi$  jest stałe; drugi wyraz przedstawia sobą ćosinusoidę, a trzeci sinusoidę o okresach dwa razy mniejszych od okresów prądu i napięcia i o wartościach maksymalnych:

$$\frac{V_{max} \cdot J_{max} \cdot \cos \varphi}{2} \text{ i } \frac{V_{max} \cdot J_{max} \cdot \sin \varphi}{2}. \text{ Wy-}$$

kreślnie przedstawiają się te linje, jak na rys. 146 d, gdzie są także wykreślone krzywe napięcia, natężenia i mocy. Odejmując rzędne dwóch ostatnich krzywych w wyrażeniu na moc prądu od rzędnych prostej:

$$\frac{V_{max} \cdot J_{max} \cos \varphi}{2}, \text{ znajdziemy moc prądu w dowolnej}$$

chwili. Ponieważ wartości średnie rzędnych dwóch ostatnich krzywych za jeden okres są równe zeru, gdyż krzywe częściowo znajdują się nad osią odciętych, częściowo pod osią, więc średnia wartość mocy za cały

$$\text{okres jest równą stałemu wyrażeniu: } \frac{V_{max} \cdot J_{max} \cos \varphi}{2}.$$

Zastępując wartości maksymalne przez wartości skuteczne:  $V = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}}$ ;  $J = \frac{J_{max}}{\sqrt{2}}$  znajdziemy:

$$P_1 = \frac{V\sqrt{2} \cdot J\sqrt{2}}{2} \cdot \cos \varphi = VJ \cdot \cos \varphi, \text{ gdzie } P_1 —$$

moc średnia,  $V$  i  $J$  — wartości skuteczne napięcia i natężenia. Jeżeli napięcie jest zgodne w fazie z prądem, to  $\varphi = 0$ ;  $\cos \varphi = 1$  i  $P_1 = VJ$ . Taka jest moc prądu jednofazowego, albo moc w jednej fazie prądu trójfazowego. Chcąc znaleźć moc we wszystkich trzech fazach należy wyrażenie powyższe pomnożyć przez 3:  $P' = 3 VJ$ , gdzie  $V$  i  $J$  — napięcie i natężenie prądu w jednej fazie.

Gdybyśmy chcieli powyższy rachunek zastosować do przewodów, to okaże się, że wynik jest  $\sqrt{3}$  razy za duży, bo widzieliśmy, że przy połączeniu w gwiazdę natężenie wynosi tylko  $J \sqrt{3}$ , a przy połączeniu w trójkąt napięcie międzyfazowe jest tylko  $V \sqrt{3}$ . Należy więc rezultat ten podzielić przez  $\sqrt{3}$ , ponieważ jednak:  $\frac{3}{\sqrt{3}} = \sqrt{3} = 1,73$ , więc moc prądu trójfazowego obliczamy ze wzoru:

$$P = VJ \sqrt{3} = 1,73 VJ.$$

Gdy prąd trójfazowy przepływa po obwodzie z samoindukcją, to otrzymamy w ten sposób moc pozorną; chcąc mieć moc rzeczywistą w obwodzie z samoindukcją, należy rezultat pomnożyć przez współczynnik mocy  $= \cos \varphi$ , otrzymamy wówczas:

$$P = VJ \sqrt{3} \cdot \cos \varphi = 1,73 VJ \cdot \cos \varphi.$$

Dotychczasowe nasze rozważania dotyczyły tego wypadku, kiedy wszystkie fazy były jednakowo obciążone. Założmy teraz, że obciążenie faz jest niejednakowe. Oznaczmy napięcia w poszczególnych fazach, napięcia międzyfazowe, natężenia prądów w fazach i w przewodach w pewnej chwili odpowiednio przez:  $V_1, V_2, V_3; V_{1,2}, V_{1,3}, V_{2,3}; J_1, J_2, J_3; i_1, i_2, i_3$ . Moc prądu trójfazowego w danej chwili wyniesie:  $P_t = V_1 J_1 + V_2 J_2 + V_3 J_3$ . Przy połączeniu w gwiazdę:  $J_1 = i_1; J_2 = i_2; J_3 = i_3$ ; nadto:  $J_1 + J_2 + J_3 = i_1 + i_2 + i_3 = 0$ ; stąd:  $i_3 = -i_1 = i_2$ ; podstawiając tę wartość do wzoru na moc prądu, znajdziemy:  $P_t = V_1 i_1 + V_2 i_2 + V_3 (-i_1 - i_2) = (V_1 - V_3) i_1 + (V_2 - V_3) i_2$ ; ale  $V_1 - V_3 = V_{1,3}; V_2 - V_3 = V_{2,3}$  (rys. 145 c), więc:  $P_t = V_{1,3} \cdot i_1 + V_{2,3} \cdot i_2$ . Przy połączeniu w trójkąt:  $V_1 = V_{1,2}; V_2 = V_{2,3}; V_3 = V_{3,1}$ , przytem:  $V_{2,3} + V_{3,1} = (V_C - V_B) + (V_A - V_C) = V_A - V_B = -(V_B - V_A) = -V_{1,2}$  (rys. 146 b). Sąd moc:  $P_t = V_1 J_1 + V_2 J_2 + V_3 J_3 = V_{1,2} \cdot J_1 + V_{2,3} \cdot J_2 + V_{3,1} \cdot J_3 = -(V_{2,3} + V_{3,1}) J_1 + V_{2,3} J_2 + V_{3,1} J_3 = V_{2,3} (J_2 - J_1) + V_{3,1} (J_3 - J_1)$ , ale:  $J_2 - J_1 = i_2; J_3 - J_1 = -(J_1 - J_3) = -i_1$  (rys. 146 b); więc:  $P_t = V_{2,3} \cdot i_2 - V_{3,1} \cdot i_1$ . Ponieważ jednak:  $V_{3,1} = V_A - V_C = -(V_C - V_A) = -V_{1,3}$ , więc:  $P_t = V_{2,3} \cdot i_2 + V_{1,3} \cdot i_1$ .

Otrzymaliśmy więc to samo wyrażenie co poprzednio. Widzimy z tego, że przy nierównym obciążeniu faz, wystarczy zmierzyć moc prądu w dwóch fazach.

## Miernictwo elektryczne.

Aby móc mierzyć wielkości elektryczne musimy obrać sobie pewne jednostki zasadnicze, któreby nie ulegały zmianom z biegiem czasu i z którymi moglibyśmy porównywać wielkości mierzone.

W elektrotechnice mamy dwie takie jednostki: amper i om. Jednostki te noszą nazwę międzynarodowych, a wielkości ich są ściśle określone przez prawa państwowe w następujący sposób:

1 amper jest to natężenie takiego prądu stałego, który przy elektrolizie, w najdogodniejszych warunkach rozkładu, wciągu jednej sekundy wydzieli 1,111800 mgr. (miligramów) srebra z roztworu azotanu srebra;

1 om jest to opór słupka rtęci o dług. 106,3 cm. i masie 14,4521 gr. przy temp.  $0^{\circ}\text{C}$ . Przekrój takiego słupka wynosi prawie  $1\text{ mm}^2$ . Zaznaczyć należy, że określone w ten sposób wielkości oma i ampera bardzo mało różnią się od wielkości tych jednostek określonych na zasadzie ich związku z jednostkami bezwzględnyemi C.G.S.

Tak określone wzorce oma i ampera międzynarodowego posiadają tylko laboratorja centralne, t. zw. laboratorja pierwszego rzędu. W laboratorjach drugiego rzędu używa się manganinowy wzorzec oma, oraz wzorzec siły elektromotorycznej, którym służy normalne ogniwo Westona, posiadające przy temp.  $20^{\circ}\text{C}$ . siłę elektromotoryczną 1,0183 volta (patrz ogniwa galwaniczne).

Laboratorja trzeciego rzędu posiadają jako wzorce dokładne amperomierze i dokładne woltomierze (wzorce), zapomocą których można cechować amperomierze i woltomierze służące do pomiarów natężenia i napięcia prądu.

**Pomiar oporu** skutecznie można dwójakim sposobem: pośrednim lub bezpośrednim:

1) pomiar pośredni dokonywa się zapomocą zmierzenia napięcia  $V$  i natężenia  $J$  prądu (rys. 147). Zamykając klucz  $K$  przepuszczamy z baterji  $B$  prąd przez zmienny opór regulacyjny  $R$ ; w punkcie  $b$  w myśl prawa Kirchoffa nastąpi rozgałęzienie prądu, przyczem część jego popłynie przez nieznaną opór  $X$ , część przez woltomierz. Jeśli woltomierz posiada opór  $r$ , a wskazuje  $V$  woltów, to płynie przez niego prąd:

$i = \frac{V}{r}$ , reszta t.j.,  $J' = J - \frac{V}{r}$  płynie przez nieznaną opór  $X$ . Stąd w myśl prawa Ohma:

$$X = \frac{V}{J'} = \frac{V}{J - \frac{V}{r}}$$

Opór woltomierza  $r$  bywa zwykle duży, jeśli więc nie chodzi o zbytnią dokładność, to drugi wyraz w mianowniku możemy pominąć, wówczas:

$$X = \frac{V}{J}$$

sposób ten stosuje się tylko dla oporów małych, nie przekraczających 1 oma, lub gdy badany opór znajduje się pod prądem.

2) pomiar bezpośredni:

a) przez porównanie ze sobą dwóch oporów: znanego  $R$  i nieznanego  $X$  (rys. 148). Włączając klucz  $K$  do kontaktu  $a$  przepuszczamy prąd z baterji  $B$  przez galwanometr  $G$  i znany opór  $R$ . Niech opór galwanometru wynosi  $r$  omów, a siła elektromotoryczna baterji  $E$  woltów. Prąd jaki płynie z baterji wynosi:

$$J_1 = \frac{E}{R + r}$$

Teraz przełączamy klucz do kontaktu  $b$ , prąd płynie przez galwanometr i nieznaną opór  $X$  i natężenie jego wynosi:

$$J_2 = \frac{E}{X + r}$$

Dzieląc te równania stronami, otrzymamy:

$$\frac{J_1}{J_2} = \frac{X + r}{R + r}$$

a stąd:

$$X = \frac{J_1}{J_2} (R + r) - r$$

Założmy, że odchylenia galwanometru wynosiły  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$ , to:

$$\frac{J_1}{J_2} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$$

czyli:

$$X = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} (R + r) - r$$

Pomiar tego rodzaju stosuje się przy oporach dużych, wynoszących kilkaset, kilka tysięcy, a nawet kilka milionów omów. np. do pomiaru oporu izolacji, przytem inne opory muszą być w stosunku do oporności  $X$ ,  $R$  i  $r$  małe, aby mogły być pominięte.

b) pomiar oporu zapomocą omomierza. W telegrafii stosowanej obecnie w wojsku, gdzie jako przewodnik służy ziemia, zachodzi często potrzeba znać opór jaki stawia ziemia płynącym przez nią prądom.

Mamy np. dwie płyty lub siatki uziemione  $A$ ,  $B$  (rys. 149), od których na powierzchni ziemi wychodzą końce przewodów  $C$ ,  $D$ . Jeżeli pomiędzy temi przewodami będzie istniała pewna różnica potencjałów,

podtrzymywana zapomocą źródła prądu, załączonego do nich, to w ziemi pomiędzy  $A$ ,  $B$  będziemy mieli sieć rozgałęzionych prądów. Zależnie od rodzaju gleby pomiędzy  $A$  i  $B$  oraz od odległości pomiędzy niemi ziemia będzie stawiała dla tych prądów opór większy lub mniejszy, przyczem gleba sucha i skalista posiada opór większy, wilgotna i wapienna—mniejszy. O ile oporność pomiędzy dwoma uziemionemi przewodnikami wynosi ponad 300 omów, to korespondencja zapomocą stacji telegrafu przez ziemię jest niemożliwa.

Aby zmierzyć oporność ziemi pomiędzy uziemionemi płytami  $A$ ,  $B$  posługujemy się omomierzem.

Jeżeli oporność okazała się zbyt dużą, to należy zmienić miejsca uziemień. Niekiedy bywa, że tylko jedna z płyt jest niekorzystnie uziemiona, dlatego też zachodzi potrzeba wiedzieć średnią oporność każdej z uziemionych płyt wraz z ziemią w odległości połowy bazy (baza jest to odległość w prostej linii pomiędzy uziemionemi płytami). Teraz rozpatrzmy wypadek pomiaru oporności pomiędzy trzema uziemieniami  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , przedstawionemi na rys. 149. Oznaczając średnią oporność każdego uziemienia przez  $x$ ,  $y$ ,  $z$  i mierząc kolejno oporności pomiędzy każdą parą uziemień (pomiijając oporność przewodów), możemy na mocy otrzymanych pomiarów napisać trzy równania z trzema niewiadomemi:

$$x + y = p; \quad x + z = q; \quad y + z = s$$

z których z łatwością znajdziemy średnią wartość oporności każdego uziemienia.

**Omomierz.** Przyrządy służące do mierzenia oporów bezpośrednio nazywamy omomierzami. Są rozmaite systemy tych aparatów, z których rozpatrzmy tutaj



najczęściej stosowane omomierze z dwoma zwojnicami  $S_1$  i  $S_2$  złączonymi ze sobą pod kątem prostym. Zwojnice te obracają się pod wpływem pola magnetycznego pomiędzy płaskimi nasadami biegunów magnetycznych. Prąd płynący z baterji rozgałęzia się na dwa obwody, z których jeden stanowi zwojnica  $S_1$  i znany opór  $R$ , drugi zwojnica  $S_2$  i nieznyany opór  $X$  (rys. 150).

Jeżeli prądy w tych obwodach oznaczamy przez  $i_1$  i  $i_2$ , opory zwojnic —  $r'$  i  $r''$  i napięcie pomiędzy punktami  $d$ ,  $e$  przez  $V$ , to możemy napisać:

$$i_1 = \frac{V}{R + r'}$$

$$i_2 = \frac{V}{X + r''}$$

Jak wiemy, siły działające na zwojnice z prądem są proporcjonalne do natężeń pola  $H_1$  i  $H_2$ , w których znajdują się zwojnice (natężenie pola jest niejednostajne — największe w środku nasad, gdzie szczelina powietrzna jest nieduża, najmniejsze — przy brzegach), oraz do prądów  $i_1$ ,  $i_2$ . Oznaczmy współczynniki proporcjonalności przez  $K_1$  i  $K_2$ , otrzymamy wówczas:

$$F_1 = K_1 H_1 i_1$$

$$F_2 = K_2 H_2 i_2$$

Stosując odpowiednie kierunki prądów w zwojnicach osiągniemy, że siły te będą się starać obrócić zwojnice w kierunkach przeciwnych.

W chwili równowagi:  $F_1 = F_2$ ;  $K_1 H_1 i_1 = K_2 H_2 i_2$ ,

$$\text{stąd: } \frac{i_1}{i_2} = \frac{K_2 H_2}{K_1 H_1},$$

a, zamieniając prądy przez odpowiednie opory, z poprzedniego wzoru, znajdziemy:

$$\frac{X + r''}{R + r'} = \frac{K_2 H_2}{K_1 H_1}$$

Ale wielkości iloczynów  $K_1 H_1$  i  $K_2 H_2$  zależą od położenia zwojnic względem kierunku pola magnetycznego, czyli od kątów  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$ , o jakie te zwojnice się obróciły, a więc i wartości oporów będą też zależne od kąta obrotu zwojnic. Na osi zwojnic jest osadzona wskazówka pod którą znajduje się tarcza. Jeżeli teraz na miejscu oporu  $X$  będziemy włączać pewne znane opory, to na tarczy możemy sobie nacechować podziałkę, odpowiadającą wielkości odchylenia wskazówki przy włączaniu każdego z tych oporów, a następnie przy pomiarach nieznanymi oporów, odczytać ich wielkości bezpośrednio na utworzonej w ten sposób skali.

Przy  $r' = r''$  i  $X = R$ , wskazówka stać będzie na podziałce zerowej. Przy  $X > R$  odchylenia nastąpią w jednym kierunku, a przy  $X < R$  — w drugim. Na rysunku mamy jeszcze dodatkowe opory, które pozwalają rozszerzyć skalę pomiarów, mianowicie jeżeli mamy połączenie, jak na rysunku, to cały prąd płynie przez zwojnice, bo z  $a$  niema nigdzie połączenia; jeżeli teraz kontakt z  $a$  przesuniemy na  $b$  lub  $c$ , t. j. wprowadzimy opory mniejsze  $r_1 + r_2$  lub  $r_1$  (przedtem był opór  $= \infty$ ,) to tylko część prądu popłynie przez uzwojenia, a reszta przez te opory, wskutek czego wskazówka będzie się mniej wychylała. Opory te dobieramy tak, aby przy położeniach kontaktu w  $a$ ,  $b$  i  $c$  wskazówka odchyłała się jednakowo przy włączeniu nieznanymi oporów odpowiednio równych  $X$ ;  $0,1X$  i  $0,01X$ ; to nam pozwoli zbudować skalę na małe opory, a następnie odczytać na niej dziesięć i sto razy większe, zależnie od tego, jaki kontakt włączymy.

c) **Mostek Wheatston'a.** Układ mostka Wheatston'a przedstawiony jest na rys. 151. Z baterji  $B$  przy włączeniu klucza  $K$  prąd płynie do punktu  $a$ , gdzie rozdziela się pomiędzy dwa znane opory  $r_1$  i  $r_2$ , następnie przez nieznaną opór  $X$  i znany opór  $R$ ; część prądu popłynie także przez galwanometr  $G$ . Opory  $r_1$ ,  $r_2$  i  $R$  dobieramy tak, aby galwanometr nie wskazywał żadnych wychyleń, t. j. aby przez gałąź  $c, d$  prąd nie płynął; wtedy potencjały w punktach  $c$  i  $d$  będą jednakowe. Oznaczmy je przez  $V_c$  i  $V_d$ . Potencjały w punktach  $a$  i  $b$  oznaczmy przez  $V_a$  i  $V_b$ , a prąd płynący przez gałąź  $a c$  i  $a d$  przez  $i_1$  i  $i_2$  (ponieważ przez galwanometr prąd nie płynie, więc przez gałąź  $c b$  będzie przepływał prąd  $i_1$ , a przez gałąź  $d b$  prąd  $i_2$ ). W myśl prawa Ohma:

$$V_a - V_c = i_1 r_1; \quad V_a - V_d = i_2 r_2$$

Ponieważ  $V_c = V_d$ , więc odejmując stronami te równania, otrzymamy:

$$i_1 r_1 = i_2 r_2; \quad \frac{i_2}{i_1} = \frac{r_1}{r_2}$$

tak samo:

$$V_b - V_c = i_1 X; \quad V_b - V_d = i_2 R$$

a po odjęciu stronami:

$$i_1 X = i_2 R$$

stąd:

$$X = \frac{i_2}{i_1} R$$

a zamieniając stosunek  $\frac{i_2}{i_1}$  przez równy mu stosunek

$$\frac{r_1}{r_2} \text{ otrzymamy.} \quad X = \frac{r_1}{r_2} R$$

Widzimy więc, że przy tym pomiarze nie potrzebujemy znać oporów  $r_1$  i  $r_2$ , a tylko ich stosunek.

Ten sposób pomiaru stosuje się do oporów średnich wartości od 1 do 10000 omów. Jako oporniki używa się tu opory skrzynkowe, których urządzenie podane jest na rys. 152.

Końce drutów, po których płynie prąd włączamy do zacisków  $m$  i  $n$ ; prąd płynie przez płytki metalowe  $a$ ,  $b$ ,  $c$  i t. d. do zacisku  $n$  przez wetknięte między te płytki kołki metalowe  $k$ , a znikoma tylko część prądu płynie przez uzwojenia zrobione z cienkiego drutu i posiadające ściśle określony opór. Chcąc włączyć którykolwiek z tych oporów, wyjmujemy odpowiedni kołek, wówczas prąd całkowicie płynie przez odpowiedni zwój.

Inny rodzaj opornika przedstawiony jest na rys. 153. Urządzenie to jest podobne do poprzedniego; jeden koniec drutu przymocowany jest do zacisku  $m$ , drugi do nieruchomego punktu  $n$ , około którego może się obracać metalowa rączka  $k$ , dotykając kontaktów  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ; kontakty te połączone są ze sobą za pomocą uzwojeń o odpowiednich oporach. Prąd płynie od  $m$  przez pewną ilość uzwojeń do kontaktu i przez rączkę  $k$  do  $n$ . Nastawiając rączkę na odpowiedni kontakt, zmuszamy prąd do przejścia przez żadaną ilość uzwojeń oporowych.

d) Do mierzenia oporności mniejszych od jednego oma stosuje się mostek podwójny Thomsona. Sposób pomiaru jest podobny do poprzedniego (rys. 154). Dla zmierzenia oporu  $X$  przepuszcza się prąd z baterji  $B$ . Końcówki  $a$  i  $a'$  oraz  $b$  i  $c$  łączą się ze sobą przez opory  $r_1$  i  $r_2$ ; pomiędzy  $e$  i  $f$  włącza się galwanometr. Przez odpowiedni dobór oporów  $r_1$  i  $r_2$  osiągamy to, że przez galwanometr prąd nie płynie, wówczas  $V_e = V_f$ . Oznaczmy potencjały w punktach  $a$ ,  $b$ ,  $c$  i  $d$  odpowiednio przez  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  i  $V_d$ , natę-

żenie prądu w obwodzie *afd* przez  $i_1$ , a w obwodzie *bec* przez  $i_2$ . Na zasadzie prawa Ohma możemy napisać:

$$V_a - V_f = i_1 r_1; \quad V_b - V_c = i_2 r_2$$

a ponieważ  $V_f = V_c$ , więc:

$$V_a - V_b = i_1 r_1 - i_2 r_1 = (i_1 - i_2) r_1$$

Z drugiej strony:

$$V_f - V_d = i_1 r_2; \quad V_c - V_d = i_2 r_2$$

a stąd

$$V_c - V_d = i_1 r_2 - i_2 r_2 = (i_1 - i_2) r_2$$

Dzieląc otrzymane równania przez siebie stronami otrzymamy:

$$\frac{V_a - V_b}{V_c - V_d} = \frac{(i_1 - i_2) r_1}{(i_1 - i_2) r_2} = \frac{r_1}{r_2}$$

Oznaczmy natężenie prądu, który przepływa przez opory  $R$  i  $X$  przez  $J$ , to:

$$J R = V_a - V_b; \quad J X = V_c - V_d$$

$$\frac{V_a - V_b}{V_c - V_d} = \frac{J R}{J X} = \frac{R}{X}$$

stąd:

$$\frac{R}{X} = \frac{r_1}{r_2}; \quad X = R \frac{r_2}{r_1}$$

Tutaj opory  $r_1$  i  $r_2$  musimy brać dość duże, aby uniknąć wpływu oporów drutów łączących. Mostek ten znalazł zastosowanie w fabrykach przy badaniu oporu właściwego drutów, przyczem opór  $R$  stanowi w tym wypadku drut skalibrowany (rys. 155).

Penieważ trudno jest dobrać takie opory  $r_1$  i  $r_2$ , aby prąd nie płynął przez galwanometr, więc ustalamy je dowolnie w pewnym stosunku, np. 1:100 lub

1 : 1000 i t. d., a zmieniamy opór  $R$ , przesuując kontakt ślizgowy  $S$  wzdłuż drutu skalibrowanego  $AB$ ; przytem nie staramy się w galwanometrze osiągnąć ściśle zerowego położenia igły, co daje się trudno zauważyć i prowadzi do błędnych wyników, lecz uwzględniamy w obliczeniach średni z 2-ch oporów, przy których igła galwanometru wychyla się raz nieco wprawo, drugi raz o tę samą wielkość wlewo; jeżeli te opory wynoszą  $R'$  i  $R''$ , to średni opór, przy którym najprawdopodobniej przez galwanometr prąd nie płynąłby, będzie równy:

$$R = \frac{R' + R''}{2}$$

stąd otrzymamy:

$$X = R \frac{r_1}{r_2}$$

Jeżeli długość badanego drutu między kontaktami  $C$  i  $D$  stanowi  $l$ , a średnica  $d$ , to opór właściwy jego znajdziemy:

$$\rho = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{R}{l}$$

e) **Mostek Nipolda.** Mostek Nipolda stanowi odmianę mostka Wheaston'a przystosowaną do pomiaru oporów zapomocą prądu zmiennego, przyczem galwanometr jest tu zastąpiony przez słuchawkę telefoniczną. Pomiarów takich dokonywujemy dla ciał, które pod wpływem prądu stałego ulegają elektrolizie. Budowa mostka Nipolda jest następująca: (rys. 156). Źródłem prądu zmiennego jest cewka indukcyjna z przerywaczem  $C$ , połączona z ogniwem  $B$  zapomocą wyłącznika  $k$ . Prąd z ogniwa, płynąc przez uzwojenie pierwotne cewki indukcyjnej  $DC$ , dzięki automатыcznemu przerywaniu obwodu przez przerywacz  $C$ ,

wzbudza w uzwojeniu wtórnem  $DP$ , stanowiącem część pierwotnego (autotransformator), prądy indukowane zmienne, które działając na telefon wywołują w nim wyraźne brzęczenie. Rys. 156b przedstawia połączenia wewnątrz mostka, przyczem urządzenie przedstawione na rys. 156a przedstawione jest tutaj jako źródło prądu zmiennego, literą  $E$ . Dla większej jasności drut pomiarowy  $AB$  jest na rys. wyprostowany, w rzeczywistości stanowi on okrąg. Poszukiwany opór  $X$  załączamy do zacisków 1, 2, przełącznik mosiężny ustawiamy na kontakt  $a$  i zamykamy obwód baterji za pomocą wyłącznika  $k$ ; następnie obracamy talerzykiem mosiężnym umieszczonym na odwrotnej stronie telefonu, tak długo, aż dźwięk w słuchawce telefonicznej zniknie, ewent. stanie się minimalnym. Kreska na oprawie telefonu wskaże nam na nacechowanym obwodzie talerzyka wielkość badanego oporu w omach. Obracając talerzykiem, przesuwailiśmy faktycznie ślizgacz  $S$  po drucie pomiarowym  $AB$ , aż do zrównania potencjałów punktów  $A$  i  $B$ . Zapomocą mostka Nipolda możemy mierzyć opory nie przewyższające 200 omów. Jeżeli mierzyć opór przewodników, np. linii telefonicznej 2-przewodowej zwartej na stacji krańcowej, a przytem chcemy się przekonać, czy linja ta nie jest uziemiona, to końce linii załączamy do zacisków 1, 2, zacisk 3 uziemiamy, a przełącznik mostka ustawiamy na  $b$ . Dość silny dźwięk w telefonie wskaże nam, że linja jest uziemiona.

Celem zmierzenia oporności tego uziemienia, oraz określenia, na którym z przewodników ono się znajduje, badamy na stacji krańcowej każdy przewód osobno, włączając go do jednego, a uziemienie do drugiego z zacisków 1, 2. Pomiar taki, ze względu na własności długich przewodników, (samoindukcja i pojemność) nie będzie dokładny. Prąd zmienny zastosowany w mostku Nipolda daje nam możliwość pomiaru

oporności ciał podlegających elektrolizie pod wpływem prądu stałego. Przy elektrolizie powstaje bowiem elektromotoryczna siła polaryzacji i nie można wobec tego stosować w tym wypadku prawa Ohma.

**Pomiar pojemności zapomocą mostka Seibt'a.** Mostek Seibt'a służy do mierzenia pojemności zapomocą prądów zmiennych. Zasada jego działania jest ta sama, co w mostku Nipolda. W obwodzie ze źródłem prądu zmiennego  $Z$ , mamy między punktami  $A$  i  $B$  dwa rozgałęzienia  $AOB$  i  $A DB$  (rys. 157); w odgałęzieniu  $AOB$  umieszczony jest kondensator o znanej zmiennej pojemności  $C$  i drugi, którego pojemność  $C_x$  chcemy określić. W części  $ADB$  znajduje się opór, który rozdzielamy ślizgaczem  $D$  na dwa opory  $r_1$  i  $r_2$ . Właściwy mostek stanowi odgałęzienie  $OD$  ze słuchawką telefoniczną  $T$ . Dla określenia pojemności przesuwamy ślizgacz  $D$  tak długo, aż membrana telefonu przestanie drgać i dźwięk w słuchawce zamilknie. Różnica potencjałów punktów  $O$  i  $D$  będzie wówczas  $V_0 - V = 0$  czyli spadek napięcia w przewodniku  $AO$  będzie się równał spadkowi napięcia w przewodniku  $AD$ ; możemy więc napisać:

$$\frac{V_1}{V_x} = \frac{J r_1}{J r_2} ; \text{ a ponieważ } V_1 = \frac{Q}{C} ; V_x = \frac{Q}{C_x} ;$$

$$\text{więc: } \frac{r_1}{r_2} = \frac{C_x}{C} , \text{ a stąd: } C_x = C \frac{r_1}{r_2}$$

Układ montażowy mostka Seibt'a (rys. 158) jest następujący: Jako wzorzec służy kondensator  $C$  o zmiennej pojemności od 0,527 cm.; kondensator badany  $C_x$  — włącza się do zacisków  $mn$ . Aby zapewnić przepływ prądu przez buczek  $B$ , a temsamem i jego działanie, obwód jego jest zamknięty cewką dławikową  $L$ , której zaciski dzięki spadkowi napięcia są tutaj jakby źródłem



prądu zmiennego potrzebnego do pomiaru pojemności (prąd stały nie płynąłby w obwodzie z kondensatorami). Opory  $r_1$ ,  $r_2$  składają się z 5-ciu równych oporów, do których słuchawka włącza się skokami zapomocą gniazd I, II, III i IV., umożliwiając w ten sposób połączenie ich serjami szeregowo.

Zmiana oporów  $r_1$  i  $r_2$  umożliwia określenie pojemności znacznie większych od pojemności wzorca. Korzystając z gniazdka pierwszego mierzymy pojemności do 1100 cm., II — 4100 cm., III — do 21000 cm., i IV — do 106000 cm. Pomiar odbywa się w następujący sposób: do zacisków *mn* włączamy badany kondensator, przepuszczamy prąd przez buczek i pozwoli zmieniamy pojemność kondensatora *C*, aż do zupełnego zaniku dźwięków w telefonie. Odcytujemy na skali wartość pojemności wzorca, na zasadzie której z załączonych tablic lub krzywych odnajdujemy poszukiwaną pojemność  $C_x$ . O ile w słuchawce dźwięk nie zaniknie, to przekładamy wtyczkę w oporniku do następnego gniazdka.

**Pomiar natężenia i napięcia prądu.** Do mierzenia siły prądu, zależnie od wymaganej dokładności, stosuje się galwanoskopy, galwanometry i amperomierze. Przy ścisłych pomiarach stosuje się sposób pośredni, mierzenia napięcia między końcówkami znanego oporu, skąd otrzymujemy:

$$J = \frac{V}{R}$$

Pomiar napięcia i siły elektromotorycznej skutecznia się przy pomocy woltomierzy lub też, przy ścisłych pomiarach, przez porównanie badanego napięcia lub siły elektromotorycznej z siłą elektromotoryczną normalnego ogniwa Westona.

Woltomierze budową podobne są do amperomierzy, a różnicę między temi przyrządami stanowi tylko większy opór woltomierza i sposób załączania do linii, a mianowicie amperomierz włącza się zawsze szeregowo (rys. 159), przeto przepływa przez niego cały prąd  $J$ , gdy tymczasem woltomierz łączy się z zaciskami kabli, między którymi chcemy zmierzyć napięcie, a wobec tego przepływa przez niego tylko część prądu  $i$ .

Wskutek oporu amperomierza i woltomierza pewna część prądu przekształca się w energję cieplną. Strata dla amperomierza ze względu na to, że przepływa przez niego cały prąd wynosi według prawa Joula:  $J^2 r$ , ponieważ  $J$  jest stałe, więc, aby zmniejszyć tę stratę, musimy dobrać możliwie małe  $r$ . W woltomierzu strata

ta wynosi:  $i^2 R = \left(\frac{V}{R}\right)^2 \cdot R = \frac{V^2}{R}$ , a ponieważ w danym wypadku mamy  $V$  stałe, więc dla zmniejszenia

straty robimy  $R$  możliwie duże. Np.:  $r = 0,001 \Omega$ ;  $J = 100$  amp.;  $V = 100$  volt.;  $R = 10000 \Omega$ .

Strata w amperomierzu:

$$J^2 r = 100^2 \cdot 0,001 = 10 \text{ wattów.}$$

Strata w woltomierzu:

$$\frac{V^2}{R} = \frac{100^2}{10000} = 1 \text{ watt.}$$

**Pomiar natężenia prądu.** 1. Galwanoskop (rys. 160) składa się z 2-ch uzwojeń  $A$  i  $B$  połączonych szeregowo; pomiędzy temi uzwojeniami znajduje się igła magnetyczna oparta na ostrzu lub zawieszona na nitce. Przed użyciem przyrządu należy igłę magnetyczną ustawić w płaszczyźnie południka magnetycz-

nego, a wówczas oś uzwojeń  $A$ ,  $B$  będzie prostopadła do płaszczyzny tego południka. Wskutek prądu przepływającego po uzwojeniach  $A$ ,  $B$ , igła magnetyczna, znajdując się pod działaniem 2-ch sił: poziomej składowej magnetyzmu ziemskiego i pola magnetycznego wytworzonego przez uzwojenia  $A$ ,  $B$ , odchyli się w tym lub innym kierunku, zależnie od kierunku prądu w uzwojeniach  $A$  i  $B$ . Galwanoskopy nie nadają się do pomiarów, a służą jedynie do stwierdzenia obecności prądu w obwodzie badanym.

2. **Galwanometr** różni się od galwanoskopu tem, że jest wykonany staranniej i posiada skalę pomiarową o pewnej wartości swej podziałki. Wartość podziałek galwanometrów elektromagnetycznych zależy od wielkości poziomej składowej magnetyzmu ziemskiego w danym miejscu kuli ziemskiej. Przy rozpatrywaniu urządzenia i zastosowania igły astatycznej wskazaliśmy już na urządzenie galwanometru astatycznego. Tutaj wypadnie nam tylko przypomnieć o przyczynie odchylenia się obu igieł magnetycznych (wewnętrznej i górnej) w jedną stronę pod wpływem pola magnetycznego, wytworzonego przez nieruchome uzwojenia z prądem. Otóż jeżeli zastosujemy w danym wypadku prawo Ampera (prawo pływaka), to zauważymy, że obie igły będą odchylały się zgodnie. Galwanometry astatyczne nie wymagają przed użyciem ustawiania igły w płaszczyźnie południka magnetycznego. Chcąc używać galwanometrów do mierzenia natężenia prądu, trzeba przez porównanie z amperomierzem wyznaczyć wartość każdej podziałki ich skali.

3. **Galwanometr tangencjalny** albo **busola stycznych** (rys. 161) służy do pomiaru natężenia prądu w bezwzględnych jednostkach elektromagnetycznych. Składa się on z kilku ( $Z$ ) zwoi cienkiego drutu izo-

lowanego, nawiniętego na obręczy  $A, B$  o promieniu  $R$ . W środku tych zwoi znajduje się igła magnetyczna  $NS$  osadzona na ostrzu. Przed pomiarem ustawia się płaszczyznę zwoi dokładnie w płaszczyźnie południka magnetycznego; wówczas igła pod działaniem składowej poziomej natężenia ziemskiego stanie na podziałce 0. W chwili włączenia prądu do obwodu uzwojenia, obok składowej poziomej natężenia ziemskiego  $H$ , wystąpi jeszcze składowa  $H'$  pola magnetycznego powstałego wskutek przepływu prądu przez uzwojenie i igła obróci się o pewien kąt  $\varphi$  taki, że:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{H'}{H}, \text{ skąd: } H' = H \operatorname{tg} \varphi.$$

Przy badaniu pola magnetycznego, wytworzonego przez przewodnik kołowy, znaleźliśmy wielkość natężenia tego pola:

$$H' = \frac{2 \pi z i}{R}$$

podstawiając do tego równania  $H'$ , znajdziemy:

$$H \operatorname{tg} \varphi = \frac{2 \pi z i}{R}$$

stąd:

$$i = \frac{RH}{2 \pi z} \cdot \operatorname{tg} \varphi \text{ J.E.M. lub } i = \frac{10 RH}{2 \pi z} \cdot \operatorname{tg} \varphi \text{ amp.}$$

4. Galwanometr Deprez - d'Arsonval'a składa się ze stałego magnesu  $NS$  (rys. 161 a) i umieszczonych między jego biegunami: cylindra żelaznego  $C$ , który służy do skupiania linii magnetycznych, i zwojnicy  $K$ , zawieszanej na cienkiej wstążce metalowej, do której przymocowane jest lustro  $L$ . Kiedy przez zwojnicę płynie prąd, pod wpływem pola magnetycznego, powstaje para sił, która obraca zwojnicę, dopóki mo-

ment obrotowy nie zrównoważy się z momentem skręcającym, wywołanym sprężystością metalowej wstążki. Moment obrotowy jest proporcjonalny do natężenia prądu płynącego przez zwojnicę i do natężenia pola:  $M_1 = K_1 i H$ . Moment skręcający jest proporcjonalny do kąta odchylenia:  $M_2 = k_2 \alpha$ . W chwili równowagi:  $M_1 = M_2$ ;  $K_1 i H = k_2 \alpha$ ; jeżeli natężenie pola dla każdego położenia zwojnicy jest stałe, to:

$$i = \frac{k_2}{k_1 H} \cdot \alpha = K \cdot \alpha$$

czyli natężenie prądu jest proporcjonalne do kąta wychylenia zwojnicy. Przy bardzo słabych prądach odchylenia zwojnicy obserwuje się za pomocą promienia świetlnego odbitego w lusterku.

**5. Galwanometr telegraficzny** (rys. 162) jest stosowany w aparatach telegraficznych Morse'a. Składa się on ze stałego kolankowego magnesu  $NS$ , posiadającego w środkowej części przyrządkowe występy, którymi jest zawieszony na dwóch podporach. Magnes ten znajduje się wewnątrz uzwojenia, po którym płynie prąd wytwarzający pole magnetyczne. Pod wpływem tego pola jeden z biegunów będzie wciągany do wnętrza uzwojenia  $A$ , drugi — odpychany, dzięki czemu magnes obróci się około swej osi o pewien kąt, a przymocowana do niego wskazówka odchyli się od położenia zerowego. Wpływ magnetyzmu ziemskiego znosi się tutaj przez zawieszenie magnesu na 2-óch podporach. Przyrząd ten nie nadaje się do ścisłych pomiarów, ale jest zupełnie wystarczający do użycia go w aparacie telegraficznym.

Wszystkie omawiane galwanoskopy i galwanometry mają zastosowanie tylko przy prądzie stałym, gdyż przy prądzie zmiennym, skutek ciągłej zmiany kie-

runku tego prądu, wskazówka nie da stałego wychylenia w jedną stronę, lecz będzie ciągle drgać.

**Amperomierze.** Przyrządy wskazujące bezpośrednio wielkość natężenia prądu noszą nazwę amperomierzy. Istnieje kilka sposobów budowy tych przyrządów, opartych na następujących zasadach:

a) amperomierze elektromagnetyczne oparte na zasadzie wzajemnego oddziaływania magnesu i przewodnika z prądem,

b) amperomierze elektrodynamiczne budowane na zasadzie wzajemnego oddziaływania 2-ch przewodników z prądem,

c) amperomierze cieplne, których wskazania zależą od stopnia wydłużenia drucika pod wpływem ciepła wywołującego się w nim przy przepływie prądu.

d) amperomierze indukcyjne oparte na zasadzie powstawania prądów indukcyjnych.

**Amperomierz z ruchomą zwojnicą** (typu Deprez D'Arsonval'a) składa się, jak przedstawiono na rys. 163, z nieruchomego magnesu  $NS$ , pomiędzy biegunami którego znajduje się ruchome uzwojenie  $A$  z przymocowaną do niego wskazówką. Wewnątrz uzwojenia znajduje się nieruchomy cylinder  $B$  z miękkiego żelaza, mający za zadanie zwiększanie strumienia magnetycznego, w którym obraca się uzwojenie  $A$ . Dopływ prądu z zewnątrz do ruchomego uzwojenia  $A$  uskutecznia się zapomocą 2-ch sprężyn  $C$  i  $D$ , które mają także za zadanie sprowadzanie uzwojenia  $A$  wraz ze wskazówką do pierwotnego położenia (punktu zerowego), kiedy prądu w uzwojeniu nie ma. Jak widzimy z rysunku, uzwojenie  $A$  posiada kształt ramki składającej się z dużej ilości zwoi połączonych ze sobą szeregowo w ten sposób, iż prąd dopływający przez

jedną sprężynę uzwojenia ramki przechodzi przez wszystkie zwoje i przez drugą sprężynę odpływa z przyrządu.

Pod wpływem przepływającego prądu przez zwoje ramki będzie się ona obracała w kierunku prostopadłym do kierunku linii sił pola magnetycznego istniejącego pomiędzy biegunami magnesu *NS* i żelaznym cylindrem *B*.

Kierunek wychylenia wskazówki zależy w tych amperomierzach od kierunku prądu, to też stosują się one tylko do prądów stałych.

**Amperomierz elektromagnetyczny** ze zwojnicą nieruchomą (rys. 164) składa się z uzwojenia *A*, wewnątrz którego umieszczone są 2 sztabki *B* i *C*, z których *B* jest nieruchoma, *C* — ruchoma, obracająca się dokoła osi *O*. Do sztabki *C* jest przymocowana wskazówka i sprężyna *D*, mająca za zadanie sprowadzenie sztabki *C* wraz ze wskazówką do położenia zerowego, gdy w uzwojeniu prądu nie ma. Pod wpływem pola magnetycznego wytworzonego wewnątrz uzwojenia *A* obie sztabki magnesują się jednocześnie i wskutek tego sztabka *C* będzie odpychana od sztabki *B*, a wskazówka przesunie się od punktu zerowego do pewnej podziałki skali. Przyrządy te są proste i mocne lecz mało czułe z powodu magnetyzmu szczątkowego w sztabkach *B*, *C*.

Stosuje się te amperomierze zarówno do prądów stałych, jak i zmiennych, lecz skale dla obu prądów są różne z powodu histerezy i prądów wirowych, jakie powstają przy przepływie prądu zmiennego.

**Amperomierz elektrodynamiczny** nie posiada zupełnie magnesu tylko uzwojenie ruchome, do którego przymocowana jest wskazówka, i uzwojenie nieruchome połączone z poprzednim szeregowo. W ten sposób prąd przepływa przez oba uzwojenia przyrządu.

Przedstawiony na rys. 165 schemat elektrodynamicznego amperomierza składa się z 2-ch uzwojeń nieruchomych  $A$  i  $B$ , pomiędzy którymi jest umieszczone uzwojenie ruchome  $C$  ze wskazówką. Kierunki uzwojeń  $A$  i  $B$  są tak dobrane, że przy przepływie prądu otrzymujemy pole magnetyczne zwrócone zawsze w tę samą stronę, w obu zwojnicach. Doprowadzanie i odprowadzanie prądu do uzwojenia ruchomego  $C$  odbywa się tak samo jak w amperomierzu elektromagnetycznym. Przy przepływaniu prądu przez uzwojenia  $A$ ,  $C$ ,  $B$ , niezależnie od jego kierunku, siła współdziałania wytworzonych sił magnetycznych odchyli uzwojenie ruchome, a więc i wskazówkę zawsze w tę samą stronę. Przyrządy te są więc czułe, niż przyrządy elektromagnetyczne i stosują się zarówno do prądów stałych, jak i zmiennych bez zmiany skali; przyczem dla prądu zmiennego wskazują wielkość czynną czyli skuteczną natężenia.

**Amperomierz cieplny** może być używany jednako w obwodach z prądem stałym, jak i zmiennym. Najczęściej jednak spotykamy amperomierze tego rodzaju w obwodach z prądem zmiennym, zwłaszcza w radjotelegrafji, gdzie mamy do czynienia z prądami szybkozmiennymi. Najważniejszą częścią amperomierza cieplnego jest drucik  $AB$  (rys. 166) zrobiony ze stopu platyny z irydem. Drucik ten pod wpływem prądu rozgrzewa się i wydłuża. Do drucika  $AB$  w punkcie  $a$  przymocowany jest drugi cienki drucik  $ab$ , którego koniec  $b$  jest zamocowany do nieruchomej części amperomierza. Do drucika  $ab$  w punkcie  $c$  przymocowana jest nitka jedwabna owinięta dokoła bloczka  $P$  i drugim końcem przywiązana do sprężyny  $R$ . Podczas przepływania prądu wydłużenie drucika  $AB$  zezwala na przesunięcie drucika  $ab$ , co powoduje obrót bloczka  $P$  wraz z przymocowaną doń wskazówką.



**Amperomierz indukcyjny.** Amperomierz ten stosuje się tylko do prądów zmiennych. Składa się on z tarczy aluminiowej *A* (rys. 167), która może się obracać dokoła osi *O* w szczelinie między brzegami elektromagnesu. Do osi *O* przymocowana jest sprężyna *S*, której drugi koniec jest unieruchomiony. Części powierzchni biegunowych elektromagnesu są przykryte przez płytki metalowe *B*. Gdy przez uzwojenie elektromagnesu przepływa prąd zmienny, to w szczelinie pomiędzy jego biegunami powstaje zmienne pole magnetyczne, które wywołuje prądy wirowe w tarczy i w płytkach *B*. Pod wpływem przyciągania się tych prądów tarcza *A* obraca się, dopóki moment obrotowy nie zostanie zrównoważony przez opór sprężyny *S*. Wówczas tarcza się zatrzyma, a przymocowana do osi wskazówka wskaże pewne odchylenie.

**Bocznik.** Niekiedy zachodzi potrzeba odprowadzenia z części obwodu pewnej ilości prądu. Zdarza się to wtedy, gdy w danej części obwodu chcemy załączyć przyrządy, które są przeznaczone dla mniejszego natężenia lub też gdy chcemy zmniejszyć oporność pewnej części obwodu. O ile chcemy włączyć amperomierz *A* (rys. 168 a), mający podziałkę do 10 amp. do obwodu, w którym płynie prąd o natężeniu 100 amperów, wówczas musimy 90 amp. odprowadzić z tej części obwodu do obwodu równoległe włączonego *BC*.

Tak samo w telefonach, jeżeli chcemy lepiej słyszeć, to w większości wypadków skuteczniamy to, naciskając przycisk słuchowy *C* (rys. 168 b) i załączając w ten sposób obwód *ABC*, o małej oporności, równoległe do części obwodu *AB*, mającej dużą oporność. Dzięki temu zmniejszamy znacznie wypadkową oporność w części obwodu *AB*, a przez to zmniejszamy oporność całego obwodu, i natężenie prądu w słuchawce telefonicznej zwiększa się. Taki prze-

wodnik, załączony równolegle do części obwodu i tworzący obwód odgałęziony, nazywamy **bocznikiem** lub **upustem**. Prawa Kirchoffa dają nam możliwość w każdym wypadku obliczyć natężenie prądu w rozgałęzionej części obwodów i w boczniku, a także oporność bocznika i oporność wypadkową całego rozgałęzienia.

Przy włączaniu bocznika równolegle z amperomierzem dobieramy tak ich opory, by amperomierz wskazywał wielokrotność wielkości natężenia prądu. Niech całkowity prąd płynący przez obwód wynosi  $J$  amperów (rys. 169), z tego przez bocznik przejdzie  $J'$  amperów, a przez amperomierz  $i$ . Z prawa Kirchoffa wynika, że:

$$\frac{J'}{i} = \frac{r_a}{r_b}$$

gdzie  $r_b$  i  $r_a$  — opory bocznika i amperomierza. Dodając do obu stron równania po 1 otrzymamy:

$$\frac{i + J'}{i} = \frac{r_a + r_b}{r_b}$$

albo:  $J = J' + i = i \cdot \frac{r_a + r_b}{r_b}$

Zwykle opór bocznika dobiera się:

$$r_b = \frac{1}{9} r_a, \quad \frac{1}{99} r_a, \quad \frac{1}{999} r_a \text{ i t. d.}$$

Jeżeli np. opór amperomierza

$$r_a = 1 \Omega, \quad \text{a } r_b = \frac{1}{99} \Omega,$$

$$\frac{r_a + r_b}{r_b} = \frac{1 + \frac{1}{99}}{\frac{1}{99}} = 100$$

czyli powiększamy skalę 100-krotnie.

**Pomiar natężenia prądu zmiennego.** Przy prądzie zmiennym stosuje się specjalne transformatoriki miernicze, które pozwalają mierzyć natężenie prądu bez przerywania obwodu (rys. 170), przyczem uzwojenie pierwotne takiego transformatorika składa się z jednego, rzadziej dwu zwoi grubego drutu, a uzwojenie wtórne z wielu zwoi cienkiego drutu. Wskutek prądu zmiennego w uzwojeniu  $I$ , powstaje w uzwojeniu wtórnem prąd indukcyjny, przyczem natężenie prądu w obu uzwojeniach można przyjąć za odwrotnie proporcjonalne do ilości zwoi  $Z_I$  i  $Z_{II}$ :

$$\frac{J}{i} = \frac{Z_{II}}{Z_I}$$

**Pomiar napięcia lub siły elektromotorycznej** przy dokładnych pomiarach odbywa się przez porównanie nieznanego napięcia lub siły elektromotorycznej z siłą elektromotoryczną normalnego ogniwa Westone'a (rys. 171). Sposób ten nosi nazwę metody kompensacyjnej, a zasada jego polega na dobraniu takich oporów  $r_1$  i  $r_2$ , aby przez odgałęzienie, w którym znajduje się ogniwo Westone'a prąd nie płynął, o czym możemy się przekonać, włączywszy w to odgałęzienie galwanometr.

Prąd przez galwanometr nie popłynie gdy różnica potencjałów w  $b$  i  $a$  będzie równa sile elektromotorycznej ogniwa:

$$V_b - V_a = E_n$$

Oznaczając opór baterji  $E_x$  wraz z oporem przewodników łączących przez  $R_1$ , a cały opór drugiej gałęzi, zawierającej ogniwo  $E_n$ , galwanometr, opory  $R$  i  $r$  — przez  $R_2$ , na zasadzie II prawa Kirchoffa możemy napisać:

$$\begin{aligned} E_x - i_1 (r_1 + R_1) - i_2 r_2 &= 0; \\ E_n - i_2 R_2 + i_3 R_2 &= 0. \end{aligned}$$

Jeżeli przez galwanometr prąd nie płynie, to  $i_3 = 0$ , a wówczas w myśl I prawa Kirchoffa

$$i_1 = i_2 = i$$

a wtedy powyższe dwa równania można przepisać:  $E_x - i (r_1 + R_1) - ir_2 = 0$ ;  $E_n - ir_2 = 0$ .

Z tych równań otrzymamy:

$$E_x = i (r_1 + R_1 + r_2); \quad E_n = ir_2$$

$$\frac{E_x}{E_n} = \frac{r_1 + R_1 + r_2}{r_2}$$

Opory  $r_1$  i  $r_2$  dobieramy zwykle tak duże, aby wobec nich można było pominąć nieznaczny opór przewodników łączących;

wówczas otrzymamy:

$$E_x = E_n \cdot \frac{r_1 + r_2}{r_2}$$

a stąd, znając opory  $r_1$  i  $r_2$ , obliczymy szukaną siłę elektromotoryczną.

Pozatem wielkość siły elektromotorycznej i napięcia mierzy się zapomocą woltomierzy, których systemy są takie same, jak amperomierzy, a różnicę stanowi większa ilość zwoi w zwojnicach woltomierza w celu powiększenia jego oporu.

Dla powiększenia skali woltomierzy stosuje się dodatkowe opory, które włącza się szeregowo i dobiera w ten sposób, aby otrzymać wielokrotność wskazań. Jeżeli np. woltomierz posiada opór  $R = 1000 \Omega$ , włączymy dodatkowy opór  $R' = 9000 \Omega$ , wówczas powiększymy skalę:

$$\frac{1000 + 9000}{1000} = 10\text{-ciokrotnie.}$$

Do mierzenia wysokich napięć stosuje się transformator miernicze napięciowe (rys. 172), w których

od strony wysokiego napięcia mamy dużo zwojów cienkich, a od strony niskiego — kilka zwojów grubych.

Stosunek napięć będzie proporcjonalny do ilości zwojów:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{Z_I}{Z_{II}}$$

### Z a d a n i a.

1. Cewka oporowa posiada opór  $r_1 = 10,07$  omów. Jakim bocznikiem należy połączyć jej końce, żeby opór poprawić na  $R = 10$  omów?

Oznaczając opór bocznika przez  $r_x$ , możemy napisać następujące równanie:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_x};$$

$$\text{stad: } r_x = \frac{R r_1}{r_1 - R} = \frac{0 \cdot 10,07}{10,07 - 10} = 1438,6 \text{ omów.}$$

2. Amperomierz posiada oporność  $0,2 \Omega$  i jest o podziałce do 120 amperów, a woltomierz posiada oporność  $4000 \Omega$  i jest o podziałce do 100 volt. Jak należy włączyć przyrządy te do obwodu prądu o natężeniu 180 amperów i napięciu 300 volt (rys. 173)?

Do amperomierza trzeba załączyć bocznik  $B$ , przez który musi przejść:

$$J_B = 180 - 120 = 60 \text{ amperów.}$$

Oporność bocznika powinna być:

$$\frac{J_B}{J_A} = \frac{R_A}{R_B}; \quad R_B = \frac{J_A \cdot R_A}{J_B} = \frac{120 \cdot 0,2}{60} = 0,4 \Omega$$

Jakie napięcie powinno być zużyte na spadek napięcia na dodatkowym oporze przy woltomierzu?

$$V_R = V_Z - V_V = 300 - 100 = 200 \text{ volt.}$$

Do woltomierza trzeba szeregowo włączyć opór:

$$R_x = \frac{200}{100} R_V = 2 R_V = 8000 \Omega.$$

**Pomiar mocy prądu.** Pomiar mocy prądu stałego uskutecznia się zwykle zapomocą amperomierzy i woltomierzy (rys. 174). Jak wiadomo moc prądu stałego:

$$P = V J$$

Otrzymamy więc ją, mnożąc przez siebie jednoczesne wskazania woltomierza i amperomierza. Przy takim pomiarze popełniamy pewien błąd, gdyż część prądu, w wypadku jak na rys., popłynie przez woltomierz i nie zostanie wykazana przez amperomierz. Gdybyśmy załączyli woltomierz za amperomierzem, to wskutek oporu tego ostatniego, nastąpi pewien spadek napięcia, wskutek czego woltomierz wskaże mniejsze napięcie. Chcąc więc wiedzieć dokładnie moc prądu, należy, do obliczonej w sposób podany powyżej, dodać jeszcze stratę powstałą przy przepływie prądu przez amperomierz lub woltomierz (zależnie od połączenia).

Do mierzenia mocy prądu zmiennego wskazania woltomierza i amperomierza nie wystarczają, gdyż moc jego zależy jeszcze od różnicy faz pomiędzy napięciem i natężeniem. To też moc prądu zmiennego mierzy się tylko jednym przyrządem zwanym watomierzem.

Najdokładniejsze watomierze urządzone są w ten sposób, że posiadają dwie zwojnice (rys. 175), jedną nieruchomą  $K$ , t. zw. natężeniową, a drugą ruchomą — napięciową  $k$  z dodatkowym oporem  $R$ , jak w woltomierzu. Zwojnica ta zaopatrzona jest przytem w sprężyny. Przy przepływie prądu siła wywierana przez zwojnicę nieruchomą na ruchomą, zmusza tę ostatnią

do obrotu, dopóki moment obrotowy elektrodynamiczny nie zrównoważy się z przeciwnie skierowanym momentem skręcającym sprężyn.

Pomiar mocy prądu trójfazowego można dokonać jednym watomierzem, gdy wszystkie fazy są jednakowo obciążone; przy niejednakowym obciążeniu, jak wynika z rozważań o mocy prądu trójfazowego, należy użyć dwa watomierze (rys. 176).

O ile odbiorniki są bezindukcyjne, np. lampy, to pomiar ten można dokonać przy pomocy woltomierza i amperomierza (rys. 177), wtedy przy równym obciążeniu we wszystkich fazach moc:

$$P = 3 V J$$

gdzie  $V$  — wartość czynna napięcia,  $J$  — wartość czynna natężenia prądu każdego z odbiorników.

**Pomiar pracy prądu.** Pracę prądu przy prądzie stałym możemy zmierzyć, mnożąc średnią moc obliczoną ze wskazań watomierza za pewien okres czasu lub średnią wartość iloczynu napięcia i natężenia obliczoną za ten czas, przez czas, wciągu którego je mierzyliśmy. Przy prądzie zmiennym mnożymy średnie wskazania watomierza za pewien przeciąg czasu przez ten czas. Praca więc wyrazi się wzorami:  $A = V J t$ . lub  $A = W t$  — dla prądu stałego i  $A = W t$  — dla prądu zmiennego. Osiągniemy w tych wypadkach wyniki dość dokładne, jeżeli wahania napięcia i natężenia nie ulegają dużym zmianom.

Dla dokładnego obliczenia pracy służą liczniki, których systemy bywają rozmaite. Rozpatrzmy licznik prądu zmiennego najczęściej stosowany (rys. 178).

Prąd główny płynie tutaj przez zwojnice nieruchome  $SS$ , prąd odgałęziony — od  $a$  płynie przez duży opór  $r$ , szczotki  $k_1$  do ruchomych zwojnic  $M$  i następnie przez szczotki  $k_2$  i zwojnicę  $s$  do  $b$ . Zwoje nie-

ruchome pod wpływem prądu wytwarzają pole magnetyczne o liniach sił poziomych. Pole to wywiera działanie na pionowo umieszczone zwojnice  $M$ , wskutek czego bęben, na którym te zwojnice są umocowane otrzymuje ruch obrotowy. Moment obrotowy jest tutaj proporcjonalny do prądu  $J$ , który przepływa przez zwojnice nieruchome i do prądu  $i$ , przepływającego przez zwojnice ruchome:

$$M = K_1 i J$$

gdzie  $K_1$  współczynnik proporcjonalności.

Jeżeli napięcie pomiędzy punktami  $a$  i  $b$  oznaczymy przez  $V_{ab}$ , to możemy napisać według prawa Ohma:

$$i = \frac{V_{ab}}{R}$$

gdzie  $R$  opór całego odgałęzionego obwodu, a stąd mamy:

$$M = \frac{K_1}{R} V_{ab} J$$

U dołu na osi licznika umocowana jest tarcza miedziana  $T$  obracająca się w polu magnesów stałych  $NS$ . Podczas obrotu tarczy powstają w niej prądy wirowe, na które magnesy działają w ten sposób, że hamują ruch tarczy. Ponieważ siła prądów wirowych jest proporcjonalna do siły elektromotorycznej indukcji powstającej w tarczy, a siła indukcji jest proporcjonalna do szybkości obrotowej tarczy, to, oznaczając przez  $J'$  natężenie prądów wirowych, przez  $n$  — ilość obrotów tarczy, przez  $K_2$  — współczynnik proporcjonalności możemy napisać:

$$J' = K_2 n$$

Moment hamujący magnesów jest proporcjonalny do siły prądów wirowych:

$$M_1 = K_3 J' = K_2 K_3 n$$



Kiedy nastąpi stan równowagi, t. j. licznik zacznie się obracać ze stałą szybkością, te dwa momenty muszą być równoważne:

$$M_1 = M \text{ albo: } \frac{K_1}{R} V_{ab} J = K_2 K_3 n$$

Pomnóżmy obie strony tego równania przez czas  $t$ , wciągu którego płynął prąd stały o natężeniu  $J$  i napięciu  $V_{ab}$ :

$$\frac{K_1}{R} V_{ab} J t = K_2 K_3 n t$$

Oznaczmy wielkości stałe:  $\frac{K_2 K_3 R}{K_1} = K$ ;  $n t = N$ ,

to praca:  $A = V_{ab} J t = K N$ .

Widzimy więc, że praca jest proporcjonalna do ilości obrotów licznika. Jeżeli oś licznika połączymy zapomocą przekładni ślimakowej i kółek zębatych z mechanizmem zegarowym, poruszającym tarcze z odpowiednimi cyframi, to przy odpowiednim dobraniu ilości uzwojeń w zwojnicach, wielkości tarczy i siły magnesów hamujących, możemy na liczniku otrzymać obliczoną pracę wykonaną przez prąd.

### Maszyny elektryczne.

**Prądnice.** Maszyny przetwarzające pracę mechaniczną (silników spalinowych, wodnych lub parowych) w pracę prądu elektrycznego, dzięki indukcji elektromagnetycznej, nazywamy prądnicami.

Przy rozpatrywaniu zjawiska indukcji elektromagnetycznej widzieliśmy, że w przewodniku zmieniającym swe położenie w polu magnetycznym powstaje elektromotoryczna siła indukcji, której kierunek został

określony zapomocą reguły prawej ręki. Obojętną jest przytem rzeczą, czy przewodnik porusza się względem pola, czy też pole magnetyczne względem przewodnika, chodzi jedynie o to, aby strumień magnetyczny, który przecina przewodnik, ulegał zmianom. Najstosowniejsem do wzbudzania elektromotorycznej siły indukcji okazał się ruch obrotowy, to też w prądnicach mamy przewodnik nawinięty na pierścień lub bęben żelazny (dla wzmocnienia pola magnetycznego), obracający się między biegunami elektromagnesów, względnie przewodnik umieszczony nieruchomo i wirujące około niego elektromagnesy.

Wielkość siły elektromotorycznej zależy od gęstości linii magnetycznych  $B$ , od długości przewodnika  $l$  i od szybkości względnej  $v$ :

$$E = B l v$$

Z wzoru tego widzimy, że siłę elektromotoryczną możemy zwiększać w trojaki sposób:

1) przez wzmocnienie pola  $B$ , co daje się osiągnąć z trudnością i w niewielkich granicach,

2) przez zwiększenie szybkości względnej  $v$ ; tutaj jesteśmy ograniczeni wytrzymałością na rozerwanie wirujących mas;

3) przez zwiększenie długości przewodnika, co stanowi dziś najważniejszy i decydujący sposób zwiększania siły elektromotorycznej, a osiągnany jest przez układanie przewodnika w zwoje, tak aby siły elektromotoryczne w poszczególnych zwojach dodawały się. Zwoje takie nakłada się na specjalny rdzeń żelazny t. zw. twornik, który wiruje w polu magnetycznym wytwarzanym przez magneśnicę. Końce zwojów połączone są z kolektorem względnie ze specjalnymi pierścieniami, po których ślizgają się szczotki odprowadzające prąd do obwodu zewnętrznego.

Zależnie od otrzymywanego w obwodzie zewnętrznym prądu rozróżniamy prądnice prądu stałego i prądnice prądu zmiennego (alternatory, generatory).

**Budowa i praca prądnic prądu stałego.** — Zasadniczymi częściami prądnic prądu stałego są: magneśnica, twornik, kolektor i szczotki, przy czem w prądnicach tych magneśnica jest nieruchoma, a wiruje twornik z uzwojeniem.

**Magneśnica** składa się z jarzma, pieńków i nabiegunków (rys. 179 a) odlanych ze stali. Niekiedy pieńki i nabiegunniki są razem wycięte z cienkich blach, w celu uniknięcia prądów wirowych, i przyśrubowane do jarzma (rys. 179 b). Nabiegunniki dają się w tym celu, aby obchwytywały większą część powierzchni twornika i zapobiegały w ten sposób rozpraszaniu się linii magnetycznych. Na pieńkach osadzone są cewki magnesujące (rys. 180), przez które przepuszcza się prąd dla wytworzenia pola magnetycznego (wzbudzenie prądnicy). Na rys. 181 pokazana jest prądnica 4-biegunowa z osadzonemi na biegunach cewkami magnesującemi (powierzchnie zakreskowane), i umieszczonym wewnątrz twornikiem, przy czem kierunki strumieni magnetycznych wskazane są strzałkami.

**Twornik** składa się z rdzenia żelaznego w kształcie pierścienia lub bębna, na który jest nawinięte uzwojenie. Rdzeń ten dla zmniejszenia strat na prądy wirowe i histerezę jest złożony z oddzielnych krążków wyciętych z blachy. Krążki, izolowane pomiędzy sobą, po osadzeniu na wał i ściśnięciu pod prasą hydrauliczną, zamocowane zostają przy pomocy 2-ch tarcz osadzonych z brzegów na wał na gorąco, przy czem całość jest zaklinowana na wale.

Na rys. 182 przedstawiony jest twornik w kształcie bębna, na powierzchni jego zrobione są specjalne rowki podłużne, w których układa się uzwojenie. Na wspólnym wale z twornikiem osadzony jest kolektor (z lewej strony), do którego działek przylutowane są końce uzwojeń twornikowych.

Tworniki w kształcie pierścienia nie są ekonomiczne, gdyż część uzwojeń, znajdujących się wewnątrz pierścienia, nie przecinana przez strumień magnetyczny, nie przyczynia się do wytwarzania elektromotorycznej siły, natomiast nawinięcie takiego twornika przedstawia duże trudności, dlatego też w ostatnich czasach budują przeważnie tworniki bębnowe, które posiadają jeszcze tę zaletę, że uzwojenie w nich może być oddzielnie nawinięte w postaci cewki, a następnie ułożone w specjalnie dla tego celu wycięte rowki.

Rozpatrzmy teraz powstawanie siły elektromotorycznej w uzwojeniu twornikowym prądnicy 2-biegowej (rys. 183 a). Widzimy, że przy wirowaniu tego uzwojenia w polu magnetycznym w obu jego połowach powstaną elektromotoryczne siły indukcji o jednakowej wielkości, lecz o przeciwnych kierunkach i jeżelibyśmy obwód taki bezpośrednio zamknęli, to prąd w nim nie powstanie (rys. 183 b), gdyż suma sił elektromotorycznych w tak zamkniętym obwodzie:

$$\sum E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots - E'_1 - E'_2 - E'_3 - \dots = 0$$

Uzwojenie takie może być porównane do 2-ch grup ogniw połączonych równolegle, przyczem w każdej grupie znajduje się jednakowa ilość jednakowych ogniw połączonych ze sobą szeregowo (rys. 184). Podczas wirowania uzwojenia siły elektromotoryczne w poszczególnych jego częściach będą po 2 razy na jeden obrót zmieniać swój kierunek, ale suma ich zawsze pozostanie równa 0.

Aby praktycznie wykorzystać elektromotoryczne siły powstające w obu połowach uzwojenia twornikowego, wystarczy na linii neutralnej umieścić 2 szczotki:  $a$ ,  $b$ , dotykające tych uzwojeń; wówczas, jak widzimy z rys. 185, siły elektromotoryczne w obwodzie zewnętrznym, np. w oporniku lampowym, będą miały jednakowy kierunek i otrzymamy t. zw. prąd stały. Jeżeli uzwojenie twornikowe posiada  $Z$  zwojów, to połączenie ze sobą obu części uzwojenia twornikowego zapomocą szczotek  $a$ ,  $b$ , jest podobne do połączenia mieszanego ogniw galwanicznych (rys. 186), przyczem grupy ogniw  $A$  i  $B$  połączone ze sobą równolegle odpowiadają 2-m połowom uzwojenia twornikowego  $A$  i  $B$ ; a ogniwa połączone pomiędzy sobą szeregowo, których każda grupa będzie posia-

dała  $\frac{Z}{2}$  — zwojom uzwojenia twornikowego.

W rzeczywistości szczotki nie stykają się bezpośrednio z wirującymi zwojami twornika, lecz ślizgają się po kolektorze składającym się ze sztabek miedzianych zwanych działkami kolektora, do których są przymocowane końce poszczególnych części uzwojenia twornikowego; części te nazywamy sekcjami. Na rys. 187 uzwojenie twornika składa się z 4-ch sekcji. Sekcje posiadają jednakową ilość zwojów i są rozmieszczone zupełnie symetrycznie. Do każdej działki kolektora jest przymocowany koniec jednej sekcji i początek następnej, kolektor więc posiada tyle działek, ile jest sekcji w uzwojeniu twornikowym. Działki kolektora są pomiędzy sobą izolowane zapomocą warstwy miki o grubości mniejszej od powierzchni styku szczotki z kolektorem, a to dlatego, żeby w momencie, kiedy szczotka przechodzi z jednej działki na drugą nie zaszła przerwa obwodu prądu.

Z powyższego widzimy, że przez zastosowanie szczotek i kolektora, z prądu zmiennego wytwarzanego przez wirujące uzwojenie twornika, otrzymamy w obwodzie zewnętrznym prąd o stałym kierunku.

Jeżeli w układzie spółrzędnych prostokątnych przedstawimy wykres napięcia na zaciskach szczotkowych prądnicy, pokazanej na rys. 187, uzwojenie twornikowe której składa się z 4-ch sekcji, rozmieszczonych jedna względem drugiej pod kątem  $90^\circ$ , to zauważymy, że fazy krzywych przedstawiających zmianę tego napięcia na końcówkach każdej sekcji w przeciągu jednego okresu będą również przesunięte względem siebie o  $90^\circ$ , co wskazują linie kreskowane (rys. 188 a). Wypadkowe napięcie przy każdym położeniu twornika otrzymamy, dodając do siebie napięcia na końcach sekcji znajdujących się po jednej stronie linii neutralnej. To wypadkowe napięcie przedstawione jest na rysunku w postaci krzywej ciągłej. Jak widzimy wypadkowe napięcie nie opada tutaj do zera, a ma charakter pulsujący. Przy zastosowaniu większej ilości sekcji, np. ośmiu, otrzymamy wykres napięcia na zaciskach szczotkowych jeszcze więcej zbliżony do napięcia stałego (rys. 188 b).

Zwiększając w ten sposób liczbę sekcji uzwojenia twornikowego do 16, 32, 64, otrzymamy na zaciskach szczotkowych prawie stałe napięcie, a w obwodzie zewnętrznym prąd prawie stały.

Średnia siła elektromotoryczna powstająca w jednym zwoju twornika:

$$E_{sr} = \frac{\text{liczba linii magnetycznych przeciętych przez ten zwoj}}{\text{czas wciągu którego linie zostały przecięte.}}$$

Przy jednym obrocie zwojów ilość linii sił przeciętych wynosi  $2\Phi$ , gdzie  $\Phi$  strumień magnetyczny

wychodzący z jednego bieguna. Czas jednego obrotu  $t = \frac{60}{n}$ , gdzie  $n$  ilość obrotów na minutę, wobec tego

$$E_{sr} = \frac{2\Phi}{\frac{60}{n}} = \frac{2\Phi n}{60}$$

Całkowita siła elektromotoryczna będzie równa sumie sił elektromotorycznych w poszczególnych zwojach znajdujących się po jednej stronie linii neutralnej. Jeżeli więc twornik posiada  $Z$  zwojów, to:

$$\begin{aligned} E &= E_{sr} \frac{Z}{2} = \frac{2\Phi n}{60} \cdot \frac{Z}{2} = \\ &= \frac{\Phi n Z}{60} \text{ C. G. S.} = \frac{\Phi n Z}{60} \cdot 10^{-8} \text{ woltów.} \end{aligned}$$

**Prądnice wielobiegunowe** różnią się od dopiero co rozpatrzonej dwubiegunowej tem, że posiadają nie jedną linię neutralną, lecz tyle ile jest par biegunów. Odpowiednio do tego muszą one mieć tyle szczotek ile biegunów. Jeżeli rozpatrzemy przedstawioną na rys. 189 prądnicę 4-biegunową, to zauważymy, że kierunki strumieni magnetycznych przenikających zwoje twornikowe przy wirowaniu, wywołują w nich elektromotoryczne siły indukcji zmieniające cztery razy swój kierunek podczas jednego obrotu twornika, a więc przechodzące cztery razy przez swe wartości zerowe. Prądnica więc 4-biegunowa posiada 2 linie neutralne. Na liniach tych są umieszczone 2 pary szczotek dzielące całe uzwojenie twornikowe na 4 równe części posiadające jednakową ilość sekcji. Tak samo jak w 2-biegunowej prądniczy, końce każdej sekcji są połączone z dwiema sąsiednimi działkami kolektora

(rys. 190). Przy jednym obrocie twornika ilość linii sił przeciętych przez jedno uzwojenie wynosi  $4\Phi$ , stąd średnia wielkość siły elektromotorycznej w jednym zwoju:

$$E_{sr} = \frac{4\Phi n}{60}$$

W celu otrzymania całkowitej siły elektromotorycznej należy dodać do siebie siły elektromotoryczne czwartej części zwojów uzwojenia twornika:

$$E = \frac{4\Phi n}{60} \cdot \frac{Z}{4} = \frac{\Phi n Z}{60} \text{ C. G. S.}$$

czyli jest taka sama jak dla prądnicy 2-biegunowej. Jak widzimy więc prądnice wielobiegunowe przy jednakowym uzwojeniu twornika, przy tej samej ilości obrotów i jednakowej wielkości strumienia magnetycznego wytwarzają na zaciskach szczotkowych takie same napięcie jak i prądnice 2-biegunowe, ale przez zastosowanie większej ilości par biegunów, zwiększamy natężenie prądu, którym zasilają one obwód zewnętrzny (rys. 191).

**Kolektor** składa się z tylu działek, ile sekcji posiada uzwojenie twornikowe. Na rys. 192 przedstawiony jest przekrój kolektora nasadzonego na wał. Każda działka kolektora posiada u góry występ *a*, do którego są przylutowane końce sekcji, z drugiej strony — występ *b* w kształcie trapezu, do zamocowania na wale. Działki kolektora, wyrabiane z twardej miedzi, która posiada mały opór elektryczny, są izolowane od wału i pomiędzy sobą warstwami miki. Zamocowanie ich na wale uskutecznia się zapomocą śruby *A*, nasadzonej na wał i posiadającej z jednej strony zgrubienie *c* z odpowiednimi wycięciami, a z drugiej strony — nakładkę *d* i nakrętkę *e*. Kolek-



tor jest najczulszą częścią prądnicy, musi on być tak zbudowany, aby izolacja nie sterczała z pomiędzy działek, gdyż następowalaby przerwa prądu przy przechodzeniu szczotki z jednej działki na drugą. Powierzchnia kolektora musi być dokładnie doszlifowaną, aby szczotki ślizgały się po niej swobodnie, a jednocześnie szczelnie przylegały.

**Szczotki** służą do odprowadzania prądu z uzwojeń twornika do obwodu zewnętrznego. Przy niskich napięciach stosuje się szczotki metalowe, wyrabiane z drutu miedzianego lub blaszek miedzianych; posiadają one niewielki opór, a więc dają mały spadek napięcia przy przepływie prądu z kolektora do obwodu zewnętrznego, ale za to więcej się niszczą i zdzierają kolektor. Daleko lepsze pod tym względem są szczotki węglowe, wyrabiane z sadzy, grafitu i spoiwa. Na rys. 193 przedstawione jest zamocowanie szczotek w oprawach *A*, *B*, połączonych dźwignią obracającą się dokoła wspólnego wału z kolektorem. Zapomocą tej dźwigni możemy przesunąć szczotki po powierzchni kolektora, zapobiegając tym sposobem częściowo iskrzeniu. Szczotki powinny szczelnie przylegać do powierzchni kolektora i w tym celu są przyciskane razem z oprawami zapomocą sprężyn *a*, *b*, a w oprawach regulowane są zapomocą 2-ch śrub *c*, *d*. Jedną z przyczyn iskrzenia szczotek jest silny prąd, powstający w chwili zwarcia przez szczotkę 2-ch sąsiednich działek kolektora. Na rys. 194 pokazany jest w rozwinięciu twornik pierścieniowy wraz z uzwojeniem połączonym z działkami kolektora oraz jedną szczotką. W chwili zwarcia przez szczotkę działek 1 i 2, w uzwojeniu łączącym te dwie działki prąd prawie zaniknie, gdyż popłynie całkowicie przez szczotkę, która przedstawia daleko mniejszy opór. Ale, jak wiemy, przy zanikaniu prądu powstaje elektromotoryczna siła samo-

indukcji, która wywoła bardzo silny prąd w obwodzie zwartym; gdy szczotka schodzi z działki 2 kolektora, powierzchnia styku pomiędzy tą działką i szczotką zmniejsza się (tworzy się jakby ostrze), wskutek czego wzrasta w tem miejscu gęstość prądu do tego stopnia, że w chwili zsunięcia się szczotki przeskakują pomiędzy nią i działką ładunki elektryczne powodując powstawanie iskry. Ponieważ w zwojach przechodzących przez linię neutralną następuje zmiana kierunku prądu, czyli t. zw. **komutacja**, więc często się mówi, że szczotki iskrzą przy komutacji.

Chcąc uniknąć iskrzenia, należy szczotki przesunąć o pewien kąt w kierunku obrotu twornika, wówczas krótko zwarte zwoje znajdują się w polu działania odpowiednich biegunów elektromagnesów, wskutek czego pojawią się w nich elektromotoryczne siły indukcji, które wywołają w tych zwojach prądy przeciwne do prądów samoindukcyjnych, a więc zmniejszające ich działanie. Ideałem jest takie przesunięcie szczotek, przy którym w krótko zwartych zwojach powstaną prądy równe co do wartości lecz o kierunkach przeciwnych niż prądy samoindukcyjne. Przy większem obciążeniu prądnicy, musi ona dostarczać więcej prądu, a więc siła elektromotoryczna samoindukcji i powstający wskutek niej prąd w krótkozwartym zwoju będą większe, należy więc szczotki przesunąć o większy kąt, aby wywołać odpowiedniej wielkości prąd przeciwny. Widzimy więc, że w miarę wzrostu obciążenia należy szczotki przesunąć coraz dalej, co stanowi wadę tego sposobu unikania iskrzenia.

Innym środkiem zapobiegającym iskrzeniu jest zastosowanie dodatkowych elektromagnesów zwanych **kompensacyjnymi**. Elektromagnesy kompensacyjne posiadają uzwojenie, po którym przepływa cały prąd zasilający obwód zewnętrzny; są one rozmieszczone na liniach prostopadłych do osi biegunów magnęsnicy

(rys. 197), a uzwojenia ich są nawinięte w ten sposób, że wytwarzają bieguny jednoimienne z najbliższymi biegunami magnesnicy w kierunku ruchu twornika. Dzięki strumieniowi magnetycznemu wytwarzanemu przez bieguny kompensacyjne, powstaje w krótko zwartym zwoju siła elektromotoryczna znosząca działanie siły elektromotorycznej samoindukcji. W miarę wzrastania natężenia prądu w uzwojeniu twornika, wzrasta siła elektromotoryczna samoindukcji, ale jednocześnie zwiększają swoje działanie bieguny kompensacyjne, gdyż i przez ich uzwojenie przepływa ten zwiększony prąd. W tym wypadku unikamy przesuwania szczotek przy każdej zmianie natężenia prądu w uzwojeniach twornika. Przez zastosowanie biegunów kompensacyjnych nie zawsze jednak można uniknąć zupełnego iskrzenia szczotek, gdyż na iskrzenie to wpływa także t. zw. **reakcja twornika**. Mianowicie, pod wpływem prądu płynącego po uzwojeniach twornika powstaje strumień magnetyczny o kierunku prostopadłym do kierunku strumienia elektromagnesów (rys. 195 a).

W rzeczywistości nie będzie tam dwóch oddzielnych pól magnetycznych, gdyż po nałożeniu się na siebie, dają one jedno pole wspólne, nieco skręcone. Jeżeli wektor  $OA$  odpowiada co do wielkości i kierunku natężeniu pola magnesnicy  $NS$ , a wektor  $OB$  — wielkości i kierunkowi natężenia pola wytworzonego przez uzwojenie twornikowe z prądem, to wielkość i kierunek natężenia wypadkowego pola magnetycznego wskaże przekątna  $OC$  prostokąta  $OACB$  (rys. 195 b). Widzimy więc, że wskutek strumienia magnetycznego, wywołanego przez prąd w uzwojeniach twornika, strumień magnetyczny elektromagnesów zostaje odkształcony, a przez to i linja neutralna zostaje jakoby obrócona o pewien kąt w kierunku obrotu twornika. Na rys. 196 a przedstawiony jest strumień magnetyczny

magneśnicy, gdy w uzwojeniu twornika prąd nie płynie, na rys. 196 b — ten sam strumień, odkształcony wskutek pola wytworzonego przez prąd płynący w uzwojeniach twornika. Jasnym jest, że im większy prąd płynie po uzwojeniach twornika, a więc im więcej prądnic jest obciążona, tem większe jest odkształcenie strumienia magnetycznego magneśnicy i tem dalej odchyła się linja neutralna od swego normalnego położenia. Wskutek odchylenia linii neutralnej, należy w miarę wzrastania obciążenia, przesuwać szczotki coraz to dalej w kierunku obrotu twornika. W celu uniknięcia tego zjawiska, daje się na elektromagnesach tak dużą ilość zwojów, aby pole magnetyczne, wytworzone przez prąd twornika okazało się niewielkie w stosunku do pola elektromagnesów. Często też na elektromagnesach nawija się jeszcze kilka grubych zwojów włączonych w obwód prądu głównego t. j. uzwojeń twornika. Prąd płynący w zwojach takich, zwanych **kompensacyjnymi**, wytwarza pole magnetyczne przeciwne do pola wytworzonego przez prąd twornika. Wskutek reakcji twornika strumień magnetyczny elektromagnesów zostaje skręcony, dzięki czemu siła elektromotoryczna, a więc i prąd powstaje w zwojach twornika znajdujących się nie pod biegunami, lecz nieco dalej w kierunku obrotu twornika. Prąd ten wywołuje pole magnetyczne, które osłabia pole elektromagnesów (rys. 196 c). Widzimy więc, że szkodliwy wpływ reakcji twornika polega na skręceniu i osłabieniu strumienia magnetycznego elektromagnesów.

**Wzbudzanie prądnic.** Ażeby wzbudzić prądnicę, t. j. otrzymać na jej zaciskach pewne napięcie, należy wywołać w uzwojeniu twornika siłę elektromotoryczną indukcji. W tym celu należy wytworzyć pole magnetyczne przez doprowadzenie prądu do uzwojeń elektromagnesów magneśnicy. Prąd zasilający uzwojenia elek-

tromagnesów może pochodzić z obcego źródła lub też z tej samej prądnicy, i może być w rozmaity sposób doprowadzany do tych uzwojeń. Pierwotnym typem prądnic są prądnice magneto-elektryczne używane jeszcze obecnie do zapłonu w silnikach spalinyowych pod nazwą „magneto” (rys. 198). Pole magnetyczne, w którym obraca się twornik jest tutaj stałe, wytwarzane przy pomocy magnesu stałego. Magnes taki wskutek ciągłych wstrząśnień i reakcji twornika czasem słabnie i wymaga częstego magnesowania. W nowoczesnych prądnicach pole magnetyczne jest wytwarzane przez elektromagnesy zasilane prądem z innego źródła, np. baterji akumulato:ów, albo od zacisków innej prądnicy — prądnice obcowzbudne, albo też od zacisków tej samej prądnicy — prądnice samowzbudne. Prądnice samowzbudne, zależnie od sposobu załączenia obwodu elektromagnesów do zacisków twornika, mogą być: bocznikowe, szeregowo (głównikowe), i bocznikowo-szeregowo. Przy puszczeniu w ruch wszystkich prądnic samowzbudzających się, twornik ich obraca się początkowo w polu magnetycznym wytworzonym przez magnetyzm szczątkowy w rdzeniach elektromagnesów. Dzięki temu w uzwojeniu twornikowym powstaje mała elektromotoryczna siła indukcji, która wywołuje następnie słaby prąd w uzwojeniu elektromagnesów. Prąd ten wzmacnia pole magnetyczne elektromagnesów, a temsamem zwiększa się elektromotoryczna siła indukcji w uzwojeniu twornikowym, a więc i wzrasta prąd w uzwojeniu elektromagnesów i t. d.

Zdawałoby się, że przy takim wzbudzaniu, siła elektromotoryczna w uzwojeniach twornika powinna wzrastać do nieskończoności. Jak wskazuje doświadczenie, siła elektromotoryczna wzrasta tylko do pewnej granicy i później utrzymuje się stała. Aby wyjaśnić to zjawisko, należy przypomnieć, że siła elektromoto-

ryczna jest proporcjonalna do strumienia magnetycznego i do ilości obrotów  $E = k\Phi n$ , gdzie  $k$  — wielkość stała dla danej prądnicy, zależy od uzwojenia twornika. Przy stałej ilości obrotów twornika:  $E = k'\Phi$ . Strumień magnetyczny zależy od prądu magnesującego i zmienia się mniejwięcej, jak na rys. 198 a, gdzie  $\Phi_0$  oznacza strumień magnetyczny szczątkowy. Zmiana siły elektromotorycznej  $E$  pod wpływem zmiany prądu magnesującego  $i_m$  przedstawi się taką samą krzywą (rys. 198 b). Weźmy pod uwagę prądnicę samowzbudną bocznikową, w której prąd magnesujący odgałęzia się od prądu twornika. Jeżeli oznaczymy opór uzwojeń elektromagnesów przez  $r_m$ , opór uzwojeń twornika — przez  $r_t$  i dodatkowy opór, służący do regulacji prądu magnesującego przez  $r$ , to prąd magnesujący:

$$i_m = \frac{E}{r_m + r_t + r} = \frac{E}{R},$$

gdzie  $R = r_m + r_t + r$ . A więc zależność siły elektromotorycznej od prądu magnesującego jest liniowa; na wykresie (rys. 198 c) otrzymamy linię prostą pochyloną do osi odciętych pod kątem  $\alpha$  takim, że:  $\operatorname{tg} \alpha = R$ . W stanie równowagi, kiedy ilość obrotów i prąd w tworniku są ustalone, obydwie zależności:  $E = k'\Phi$  i  $E = i_m R$  muszą być spełnione. Szukamy rozwiązania tych dwóch zależności, nakładając na siebie przedstawiające je wykresy (rys. 198 d). Widzimy, że linie, przedstawiające te zależności przecinają się w jednym punkcie, który wskaże do jakiej wielkości wzrośnie siła elektromotoryczna.

Może jednakże się zdarzyć, że prądnica się nie wzbudza. Jak widzimy z rys. 198 e i 198 f mogą być dwie przyczyny tego: 1) duży opór magnetyczny, spowodowany dużą szczeliną między biegunami magnetycznymi i twornikiem; 2) opór elektryczny  $R = \operatorname{tg} \alpha$  za duży, wskutek czego prosta biegnie stromo.

**Prądnica obcowzbudna.** Na rys. 199 pokazany jest układ montażowy i schemat prądnicy obcowzbudnej. Do zacisków  $c, c_1$  — uzwojenia elektromagnesów przyłączona jest bateria akumulatorów albo doprowadzany prąd z innej prądnicy. Należy przytem zwrócić uwagę na prawidłowe załączenie biegunów źródła prądu, aby nie przemagnesować rdzenia elektromagnesów. Do zacisków szczotkowych  $a, a_1$  przyłącza się obwód zewnętrzny. Jeżeli oznaczymy opór obwodu zewnętrznego przez  $r_z$ , a napięcie na zaciskach szczotkowych prądnicy przez  $V$ , to natężenie prądu w obwodzie zewnętrznym będzie:

$$J_z = \frac{V}{r_z}$$

Takie samo natężenie prądu będzie w uzwojeniu twornika, gdyż prąd nigdzie się nie rozgałęzia:

$$J_t = J_z = J.$$

Jeżeli opór uzwojenia twornika oznaczymy przez  $r_t$ , to średnia wielkość elektromotorycznej siły indukcji powstającej w uzwojeniu twornikowem:

$$E = V + J r_t$$

Napięcie na zaciskach prądnicy:

$$V = E - J r_t$$

Gdy prądnica jest nie obciążona:  $J = 0$ , wówczas:

$$V = E$$

W miarę obciążania prądnicy coraz większy prąd płynie po uzwojeniu twornika i na zaciskach prądnicy otrzymujemy coraz to mniejsze napięcie. W celu utrzymania napięcia stałego należy zwiększać siłę elektromotoryczną, przepuszczając do elektromagnesów większy prąd. Wielkość prądu magnesującego reguluje się opornikiem  $R$ .

Na wykresie (rys. 199 a) zmiana napięcia w zależności od prądu  $J$  przedstawia się nie linią prostą, opadającą w miarę wzrostu prądu, jakby wynikało z równania:  $V = E - Jr_t$ , lecz krzywą, gdyż z powodu reakcji twornika, następuje osłabienie strumienia magnetycznego  $\Phi$ , przez co zmniejsza się siła elektromotoryczna  $E$ .

**Prądnica szeregową.** Na rys. 200 pokazany jest układ montażowy i schemat prądnicy szeregowej (series-dynamo). Uzwojenie wzbudzenia jest tutaj włączone szeregowo z uzwojeniem twornikowym i z obwodem zewnętrznym. Jeżeli oznaczymy natężenie prądu w uzwojeniu wzbudzenia przez  $J_m$ , to dla prądnicy szeregowej będziemy mieli:  $J_z = J_t = J_m = J$ .

Elektromotoryczna siła indukcji w uzwojeniu twornikowym:

$$E = V + Jr_t + Jr_m = V + J(r_t + r_m)$$

Napięcie na zaciskach szczotkowych tej prądnicy może być regulowane przy takim układzie zapomocą zmiany ilości obrotów twornika. Własności tego systemu prądnicy są następujące:

- 1) prądnica nie wzbudza się przy otwartym obwodzie zewnętrznym;
- 2) przy bardzo dużej oporności obwodu zewnętrznego prądnica wzbudza się bardzo słabo;
- 3) przy zmiennym obciążeniu napięcie na zaciskach prądnicy jest zmienne: przy dużym obciążeniu będzie ono małe, przy normalnym duże, a przy bardzo małym znowu małe, gdyż z powodu dużego spadku napięcia w szeregowo połączonych uzwojeniach twornikowym i wzbudzenia, będzie duży iloczyn  $J(r_t + r_m)$ ;
- 4) prądnica może być używana przy stałym, określonym dla niej obciążeniu;



5) prądnica nie może być używana do ładowania akumulatorów, gdyż w chwili, kiedy napięcie akumulatorów przewyższy napięcie na jej zaciskach, ulegnie ona przemagnesowaniu, a obracając się nadal w tę samą stronę, będzie wytwarzać prąd o kierunku przeciwnym do poprzedniego, a więc zgodny z kierunkiem prądu płynącego od akumulatorów, co może spowodować uszkodzenie zarówno akumulatorów, jak i samej prądnicy. Aby móc regulować napięcie na zaciskach prądnicy wraz ze zmianą obciążenia, niektóre prądnice szeregowe posiadają regulowany opornik  $R$ , włączony równolegle do zacisków  $a, a_1$  uzwojenia wzbudzenia (rys. 201). Zwiększając lub zmniejszając wielkość oporu opornika  $R$  temsamem będziemy zwiększać lub zmniejszać natężenie prądu w uzwojeniu wzbudzenia, a dzięki temu zwiększy się lub zmniejszy elektromotoryczna siła w uzwojeniu twornikowym prądnicy. Taki opornik regulujący wzbudzanie prądnicy nazywamy opornikiem wzbudzenia.

Na wykresie (rys. 201 a) przedstawiona jest zmiana siły elektromotorycznej  $E$  i napięcia  $V$  w zależności od obciążenia prądnicy.

**Prądnica bocznikowa.** Na rysunku 202 przedstawiony jest układ montażowy i schemat prądnicy bocznikowej (szunt-dynamo). Uzwojenie wzbudzenia jest tutaj włączone równolegle do uzwojenia twornikowego prądnicy. W ten sposób prąd w dodatnim zacisku szczotkowym prądnicy  $a$  rozgałęzia się do uzwojenia wzbudzenia i obwodu zewnętrznego. W obwodzie wzbudzenia szeregowo do jego uzwojenia jest włączony opornik wzbudzenia  $R$ , za pomocą którego można regulować natężenie prądu magnesującego. Na mocy pierwszego prawa Kirchoffa możemy napisać następujące równanie:  $J_t = J_m + J_z$ .

Natężenie prądu w obwodzie zewnętrznym przy napięciu na zaciskach szczotkowych prądnicy równym  $V$  będzie:

$$J_z = \frac{V}{r_z}$$

Natężenie prądu w obwodzie wzbudzenia będzie:

$$J_m = \frac{V}{r_m}$$

Ponieważ oporność uzwojenia wzbudzenia, składającego się z dużej ilości zwojów cienkiego drutu jest bardzo duża, to przy odbiornikach prądu w obwodzie zewnętrznym połączonych równolegle  $J_m$  będzie bardzo małe w porównaniu do  $J_z$  — np. przy pełnym obciążeniu prądnicy, gdy  $J_z = 200$  amperów, to  $J_m = 6$  amperów.

Elektromotoryczna siła indukcji w uzwojeniu twornikowem tej prądnicy:

$$E = V + J_t r_t = V + r_t (J_m + J_z) = V + J_z r_t + \frac{V r_t}{r_m}$$

Własności prądnicy bocznikowej są następujące:

1) prądnica wzbudza się przy otwartym obwodzie zewnętrznym,

2) przy bardzo małej oporności zewnętrznej, prądnica wzbudza się bardzo słabo, gdyż mało prądu odgałęzi się do uzwojenia wzbudzenia,

3) przy zmiennej oporności zewnętrznej w pewnych granicach mało się zmienia napięcie na zaciskach prądnicy; jednakże przy znacznem obciążeniu następuje duży spadek napięcia, a przy przeciążeniu może nastąpić nawet zupełne rozmagnesowanie; zmniejszenie się napięcia na zaciskach prądnicy ze zwiększeniem obciążenia, jest spowodowane spadkiem napięcia w uzwojeniu twornikowem, oraz reakcją twornika.

4) prądnicą powinna być używana przy stałym napięciu dla niej określonym, gdyż odbiorniki prądu włączone są do niej równolegle.

5) prądnicą może być używana do ładowania akumulatorów, gdyż prąd od akumulatorów nie może jej przemagnesować i spowodować takich skutków, jak przy prądniczy szeregowy.

Ponieważ z prądnicą bocznikową będziemy mieli do czynienia przy ładowaniu akumulatorów, rozpatrzmy obecnie sposób puszczenia jej w ruch oraz regulowanie. Przy puszczeniu w ruch obwód zewnętrzny powinien być wyłączony, a opornik wzbudzania całkowicie włączony. Następnie rączką opornika doprowadzamy napięcie, które wskazuje woltomierz równolegle załączony do zacisków szczotkowych prądniczy, do normalnej wielkości i wówczas włączamy obwód zewnętrzny. Zauważymy, że wskutek tego napięcie opadnie, znowu więc zapomocą opornika wzbudzania doprowadzamy je do pierwotnej wielkości t. j. tej, która była przy biegu prądniczy nieobciążonej.

Przy włączeniu nowych odbiorników w obwodzie zewnętrznym, t. j. przy zwiększeniu obciążenia prądniczy, napięcie na zaciskach szczotkowych zmniejszy się, wobec tego zapomocą opornika wzbudzania doprowadzamy je ponownie do pierwotnej wielkości.

Przy wzroście obciążenia następuje spadek napięcia na zaciskach prądniczy (rys. 202a), a przy nadmiernym przeciążeniu (opór obwodu zewnętrznego zmniejsza się, więc prawie cały prąd popłynie przez ten obwód i tylko znikoma jego część odgałęzia się do uzwojeń elektromagnesów) lub krótkim zwarcium, jak widać z wykresu, w prądniczy takiej popłynie tylko przez chwilę duży prąd, gdyż z powodu reakcji twornika następuje zaraz rozmagnesowanie i prądnicą przestaje się wzbudzać.

**Prądnica szeregowo-bocznikowa.** Na rys. 203 jest pokazany układ montażowy i schemat prądnicy szeregowo-bocznikowej (compound - dynamo). Uzwojenie wzbudzenia składa się tutaj z 2-ch uzwojeń, z których jedno, posiadające dużą ilość zwojów cienkiego drutu, jest załączone równolegle do zacisków szczotkowych, a drugie, posiadające małą ilość zwojów grubego drutu, jest załączone szeregowo z uzwojeniem twornikowym i obwodem zewnętrznym. Oznaczając natężenie prądu w szeregowym uzwojeniu wzbudzenia przez  $J_m$ , natężenie prądu w równoległym uzwojeniu wzbudzenia przez  $J'_m$ , możemy napisać następujące równania:

$$J_m = J_z, J_t = J_z + J'_m$$

Jeżeli oznaczymy napięcie na zaciskach szczotkowych prądnicy przez  $V$ , napięcie na zaciskach obwodu zewnętrznego przez  $V_1$  — to natężenie prądu w obwodzie zewnętrznym będzie:

$$J_z = \frac{V_1}{r_z}$$

a natężenie prądu w równoległym uzwojeniu wzbudzenia:

$$J'_m = \frac{V}{r'_m}$$

Napięcie na zaciskach szczotkowych w stosunku do napięcia na zaciskach obwodu zewnętrznego będzie:

$$V = V_1 + J_m r_m = V_1 + J_z r_m$$

Elektromotoryczna siła indukcji w uzwojeniu twornikowym tej prądnicy będzie:

$$E = V + J_t r_t = V_1 + J_z r_m + r_t (J_z + J'_m)$$

Własności prądnicy szeregowo-bocznikowej są następujące:

1) prądnica wzbudza się przy otwartym obwodzie zewnętrznym,

2) przy zmiennej oporności obwodu zewnętrznego prądnic bez regulowania, automatycznie posiada stałe napięcie na zaciskach szczotkowych, gdyż równoległe uzwojenie wzbudzania napięcie zmniejsza, a szeregowie — zwiększa,

3) prądnic nie może być używana do ładowania akumulatorów, gdyż w razie większego działania magnesującego uzwojenia szeregowego niż bocznikowego, prądnic przemagnesuje się i zniszczy akumulatory, a sama zostanie uszkodzona.

Opornik wzbudzania  $R$  włączony szeregowo z równoległym uzwojeniem wzbudzania, służy tylko do regulowania napięcia na zaciskach szczotkowych prądnic przy puszczeniu jej w ruch.

Podobnie jak ogniwa możemy łączyć pomiędzy sobą prądnic. Najczęściej spotykane w praktyce połączenia są:

- a) połączenie szeregowie prądnic szeregowych,
- b) połączenie równoległe prądnic bocznikowych,
- c) połączenie równoległe prądnic szeregowo-bocznikowych.

Przy ostatniem połączeniu należy dodatnie zaciski szczotkowe prądnic połączyć przewodnikiem zwanym przewodnikiem kompensacyjnym lub wyrównawczym, służącym do wyrównania sił elektromotorycznych w obu prądnicach.

**Prądnic prądu zmiennego.** Każda prądnic prądu stałego może dostarczać prąd zmienny o ile zamiast kolektora umieścimy pierścienie, do których będą przymocowane końce uzwojeń twornika. Na rys. 204a mamy twornik z nawiniętymi zwojnicami 1, 2, 3, 4, 1', 2', 3', 4', obracający się w polu magnetycznem elektromagnesów. Dwa przeciwne punkty uzwojenia

twornika połączone są z pierścieniami,  $a$ ,  $b$ , po których ślizgają się szczotki. W zwojach twornika powstawać będą takie same siły elektromotoryczne jak i w prądnicach prądu stałego, jednakże kierunek prądu w obwodzie zewnętrznym, zależny od kierunku wypadkowej siły elektromotorycznej, będzie się tutaj zmieniał okresowo wraz ze zmianą położenia uzwojeń twornikowych w polu magnetycznym elektromagnesów. Kierunek siły elektromotorycznej w poszczególnych zwojach wskazany jest na rysunku strzałkami; prąd wypływa z uzwojenia twornika przez pierścień  $b$  do obwodu zewnętrznego i wraca do uzwojeń przez pierścień  $a$ . Gdy twornik obróci się o kąt  $90^\circ$  (rys. 204b), to zwoje 1, 1', 2, 2', znajdują się pod wpływem pola bieguna  $N$ , a zwoje 3, 3', 4, 4' — pod wpływem pola bieguna  $S$ . Siły elektromotoryczne w poszczególnych zwojach każdej grupy będą skierowane w przeciwnie strony, a ponieważ są one równe co do wielkości, więc suma ich równa się  $O$ , a wskutek tego na zaciskach szczotkowych w tem położeniu twornika napięcie będzie równe  $O$ .

Gdy twornik obróci się jeszcze o  $90^\circ$ , (rys. 204c) wszystkie zwoje szeregu 1, 2, 3, 4 znajdują się nad biegunem  $S$ , a wszystkie 1', 2', 3', 4' pod biegunem  $N$ , wskutek czego kierunki sił elektromotorycznych w poszczególnych zwojach każdej grupy będą jednakowo skierowane. Porównując rysunki 204a i 204c widzimy, że w odbiorniku kierunek prądu zmienił się na odwrotny. Przy dalszym obrocie twornika napięcie na zaciskach spadnie do wartości zera, a następnie wzrośnie do swej wartości maksymalnej, przyczem prąd zmieni znowu kierunek, i t. d.

Gdybyśmy chcieli otrzymać prąd zmienny z prądnicy 4-biegunowej, to należy zastosować także dwa pierścienie, ale połączyć je z punktami uzwojenia twornika przesuniętymi względem siebie nie o  $180^\circ$ ,

lecz o  $90^\circ$  (rys. 205), wówczas zmiany kierunku prądu będą następować co ćwierć obrotu twornika. Przy rozpatrywaniu prądu zmiennego, czas wciągu którego powtarzają się te same zmiany prądu nazwalibyśmy okresem. W prądniczy 2-biegunowej zmiany prądu odpowiadające okresowi zachodzą wciągu jednego obrotu twornika, w prądniczy 4-biegunowej — wciągu pół obrotu. Wobec tego odwrotność okresu t. j. częstotliwość (ilość zmian zachodzących wciągu sekundy) wyrazi się wzorem:

$$f = \frac{np}{60}$$

gdzie  $n$  — ilość obrotów twornika na minutę,  $p$  — ilość par biegunów.

Czynnikami wpływającymi na częstotliwość prądu indukcyjnego w tworniku są więc: ilość obrotów twornika na sekundę i ilość par biegunów wytwarzających strumień mgnetyczny, w którym wiruje twornik.

Chcąc otrzymać wielką częstotliwość prądu indukcyjnego w tworniku, musimy albo zwiększyć ilość obrotów twornika, albo ilość par biegunów magneśnicy.

W prądnicach używanych w przemyśle mamy do czynienia z prądem o małej częstotliwości, wynoszącym przeważnie  $f = 50$  okresów na sekundę, natomiast prądnice używane w radjotelegrafji dostarczają prądu o dużej częstotliwości dochodzącej obecnie do miliona okresów na sekundę.

Na przedłużeniu wału twornika znajduje się zazwyczaj mała prądnicza prądu stałego, która zasila uzwojenie magneśnicy. Jeżeli prądnicza prądu zmiennego jest źródłem prądu dla stacji radjotelegraficznej na samolocie, to prądnicza prądu stałego podczas nieczynności stacji radjotelegraficznej służy do oświetlania i ogrzewania samolotu, oraz jako źródło prądu do reflektorów.

Ze względu na system urządzenia magneśnicy i twornika, sposób odprowadzania prądu zmiennego z twornika do obwodu zewnętrznego, oraz doprowadzania prądu stałego do zasilania uzwojeń magneśnicy, rozróżniamy następujące rodzaje prądnic używanych w radjotelegrafji jako źródeł prądu zmiennego:

- a) o ruchomym tworniku i nieruchomej magneśnicy,
- b) o nieruchomym tworniku i ruchomej magneśnicy,
- c) o nieruchomym tworniku i nieruchomem uzwojeniu magneśnicy z wirującym rdzeniem żelaznym (zmieniającym wielkość strumienia magnetycznego wytworzonego przez magneśnicę).

**Prądnicą o ruchomym tworniku i nieruchomej magneśnicy.** Najprostszą prądnicą tego typu jest induktor, używany w aparatach telefonicznych do dawania sygnałów wywoławczych. Induktor wytwarza prąd zmienny (o częstotliwości około 15 okresów na sekundę), który uruchamia dzwonek spolaryzowany na stacji wywoławczej. Część wzbudzająca czyli magneśnica składa się z trzech stałych magnesów podkowiastych, z mocowanych zapomocą wspólnych nasad biegunowych *AB* (rys. 206). Twornik jest zbudowany z rdzenia żelaznego w kształcie cylindra z podłużnymi wyźłobieniami *C*, w których są ułożone około 5000 zwojów cienkiego przewodnika. W ten sposób największy strumień magnetyczny przenika uzwojenie twornika gdy ten jest w położeniu pokazanym na rysunku. Dla zwiększenia ilości obrotów twornika służy przekładnia z 2-ch kół zębatych *D* i *F*. Oba końce uzwojenia twornika są załączone w ten sposób, że jeden z nich *G* jest przylutowany do osi twornika, a tem samem do masy induktora, a drugi *H* — kontaktuje ze sprężynką (szczotka) odprowadzającą prąd z induktora na linję. W stanie spoczynku



induktora, uzwojenie twornika jest zwarte zapomocą specjalnego urządzenia. Induktory telefoniczne są zdolne do wytworzenia na końcach uzwojenia twornikowego napięcie od 30-60 wolt.

**Prądnicą o nieruchomym tworniku i ruchomej magneśnicy.** Prądnicą tego typu składa się z nieruchomego pierścienia żelaznego *A*, w wyżłobieniach którego jest ułożone uzwojenie twornika, pokazane w stanie rozwiniętym na rys. 207a. Część wirująca składa się z żelaznego koła *B* (rys. 207b) z wycięciami na obwodzie, w których jest ułożone uzwojenie magneśnicy w ten sposób, że pod wpływem prądu stałego, przepływającego przez te uzwojenia, poszczególne występy koła *B* stają się magnesami o różniamiennych sąsiednich biegunach. Końce uzwojenia twornikowego są wyprowadzone do 2-ch nieruchomych zacisków, do których są załączone przewody łączące prądnicę z odbiornikiem. Końce uzwojenia magneśnicy są połączone z dwoma pierścieniami, do których zapomocą szczotek jest doprowadzany prąd stały z innego źródła, np. z prądnicy znajdującej się na przedłużeniu wału magneśnicy.

Zmiana strumienia magnetycznego przecinającego uzwojenia twornika zachodzi w następujący sposób (rys. 208): strumień magnetyczny, wychodzący z północnego bieguna wirującej magneśnicy przenika zwoje twornika i dzieli się w jego masie żelaznej na dwie części, które podążają do południowych biegunów 2-ch sąsiednich występów koła. Jeżeli pod te same zwoje twornika podejdzie następnie południowy biegun, to strumień, przenikający te zwoje pójdzie w odwrotnym kierunku niż poprzednio. Prócz tego przy wirowaniu magneśnicy będzie zachodzić nietylko zmiana kierunku, lecz i zmiana wielkości strumienia magnetycznego przenikającego poszczególne zwoje

twornikowe w chwili zbliżania się i oddalania od nich poszczególnych biegunów magnesnicy, jak widzimy z wykresu zmiany strumienia magnetycznego, podanego na rysunku za jeden okres czasu. W występach, na których są nawinięte zwoje twornikowe, będziemy mieli w tym wypadku straty zarówno na prądy Foucault'a jak i na histerezę.

Spotykamy również prądnicę tego samego typu różniącą się od dopiero co opisanej tem, że koło wirujące magnesnicy *A* jest przy obwodzie zgrubione; wyźłobienie, znajdujące się w środku tego zgrubienia, dzieli obwód koła na 2 części *a* i *b*. W wyźłobieniu tem jest nawinięte uzwojenie magnesnicy *D*, dzięki czemu występy z każdej strony koła stają się jednolitymi biegunami magnetycznymi (rys. 209). Część nieruchoma składa się z masywu żelaznego *B*, w wyźłobieniach którego, jak i w poprzednim wypadku są nawinięte uzwojenia twornikowe. Strumień magnetyczny w tym wypadku, jak widzimy z rys. 210, przenika uzwojenia twornikowe zawsze w tym samym kierunku, zmieniając jedynie swą wartość od maksymalnej do minimalnej, zależnie od tego, czy pod zwojami twornikowymi będą się znajdowały bieguny *N*, *S*, czy też wyźłobienia obwodu koła magnesnicy. Porównując obie opisane prądnice tego typu widzimy, że przy tych samych wymiarach wirującego koła magnesnicy i tej samej ilości występów na jego obwodzie wciągu jednakowego czasu w ostatnio opisanej prądnicy zajdzie dwa razy więcej zmian strumienia magnetycznego przenikającego zwoje twornikowe, a przez to i częstotliwość prądu w tej prądnicy będzie dwa razy większa niż w poprzednio opisanej.

**Prądnica o nieruchomym tworniku i nieruchomem uzwojeniu magnesnicy z wirującym rdzeniem żelaznym.** W prądnicach tego typu uzwojenie twornikowe

$C$  i uzwojenie magneśnicy  $D$  są nieruchome, część wirującą stanowi żelazne koło zębate  $E$  (rys. 211). Przy wirowaniu tego koła będzie zachodzić zmiana

oporu magnetycznego  $\left(R = \frac{l}{\mu S}\right)$ , dzięki czemu stru-

mień magnetyczny przenikający poszczególne zwoje twornikowe będzie zmieniał swą wartość. Wskutek zmian strumienia w zwojach twornika będzie powstawała siła elektromotoryczna indukcji. Poszczególne zwoje twornikowe są nawinięte na występach części nieruchomej i końce tego uzwojenia są wyprowadzone do 2-ch zacisków  $A, B$ . Uzwojenie magneśnicy nawinięte jest na nieruchomym bębnie, wewnątrz którego przechodzi oś żelazna wirującego koła zębatego  $E$ . Dzięki temu strumień magnetyczny przenikający uzwojenia twornikowe będzie miał stały kierunek; osiąga on swoje maksimum, kiedy zęby rdzenia wirującego znajdują się naprzeciw występów części nieruchomej  $C$ ; minimum — kiedy zęby części nieruchomej znajdują się naprzeciw wyłobień na rdzeniu wirującym. Uzwojenie magneśnicy jest tutaj również zasilane prądem z innego źródła prądu (rys. 211 zaciski  $a, b$ ).

Obecnie używane w radjotelegrafii prądnice wielkiej częstotliwości są podobne do wyżej opisanej, a różnicę stanowią tylko szczegóły konstrukcyjne, spowodowane koniecznością zwiększenia par biegunów lub ilości obrotów, w celu osiągnięcia większej częstotliwości prądu. Np. prądnica transatlantyckiej stacji radjotelegraficznej warszawskiej posiada 400 biegunów i robi 2000 obrotów na minutę. Prądnica stacji radjotelegraficznej samolotowej „Y” posiada wirujące koło o 12 zębach, a na części nieruchomej są nawinięte uzwojenia twornika na 24 występach, stanowiących bieguny magnetyczne. Jeżeli koło wirujące prądnicy

robi w powietrzu 4500 obrotów na min., to częstotliwość prądu będzie:

$$f = \frac{4500 \cdot 12}{60} = 900 \text{ okresów na sekundę.}$$

Prądnica ta wytwarza prąd o mocy 350 wat. i daje na swych zaciskach twornikowych napięcie około 50 volt. Prąd wzbudzania jest dostarczany przez prądnicę nasadzoną na wspólnym wale z kołem zębatym, mającą przy tej ilości obrotów na swych zaciskach napięcie  $V = 11\frac{1}{2}$  volt, przy natężeniu prądu:  $J = 1,35$  ampera.

**Obsługa prądnic.** Prawidłowe działanie prądnic zależy od umiejętnej ich obsługi przy puszczeniu w ruch, podczas pracy oraz przy zatrzymaniu. Dlatego też trzeba się zapoznać z niezbędnymi czynnościami przy obsłudze prądnic.

a) **Puszczanie w ruch.** Gdy mamy puścić w ruch prądnicę, która długi czas nie pracowała, to przede wszystkim należy ją oczyścić z kurzu i oliwy, zwłaszcza kolektor i szczotki. Następnie, obracając powoli wał prądnicy, przemyć łożyska naftą i napełnić je oliwą, następnie sprawdzić stan izolacji uzwojenia twornikowego i uzwojenia magneśnicy w stosunku do masy statora (części nieruchomej) zapomocą galwanoskopu i baterji ogniw.

Odchylenie galwanoskopu wskaże zły stan izolacji. Następnie musimy dokładnie opatrzyć i zbadać czy:

- 1) szczotki są dobrze dotarte do kolektora, dobrze zamocowane w oprawach, oraz należycie przyciśnięte do kolektora.
- 2) oprawy szczotek (trzymadła) dobrze zamocowane do dźwigni, oraz rozmieszczone w szachownicy po całej długości kolektora,

- 3) działki kolektora są dotoczone cylindrycznie, oraz wyczyszczone zapomocą szklanego papieru średniej szorstkości (nie można używać papieru szmerglowego),
  - 4) wszystkie zaciski prócz oczyszczenia od kurzu i oliwy są oczyszczone od śniedzi i dobrze zaciśnięte,
  - 5) szczotki są ustawione w linii neutralnej według marki i dźwignia nieruchomo zamocowana (jak na rys. 193) zapomocą śruby,
  - 6) prądnica jest należycie osłonięta przed padaniem wody i oliwy z poruszającej ją maszyny parowej lub silnika spalinowego.
- b) **Podczas pracy:**
- 7) prądnica powinna być wzbudzana przy normalnej ilości obrotów maszyny parowej lub silnika spalinowego,
  - 8) wzbudzoną prądnicę należy obciążać stopniowo, a nie raptownie,
  - 9) w obciążonej prądniczy zapomocą opornika wzbudzania napięcie na zaciskach szczotkowych powinno być doprowadzone do normalnej wartości oraz zapomocą dźwigni szczotki muszą być ustawione w ten sposób, aby iskrzenie było zupełnie usunięte,
  - 10) należy nieustannie uważać na wskazania woltomierza załączonego równolegle do zacisków szczotkowych prądnicy, oraz na wskazania amperomierza, który podaje nam obciążenie prądnicy; z chwilą gdy obciążenie prądnicy dojdzie do normalnej wartości, powinno ustać włączanie nowych odbiorników w obwodzie zewnętrznym. Jeżeli zmiana obciążenia prądnicy wywoła iskrzenie szczotek, to zapomocą dźwigni muszą być

one przesunięte w nowe położenie, w którym iskrzenia zupełnie nie będzie. Jeżeli chcielibyśmy obejrzeć jakąkolwiek szczotkę, to możemy odciągnąć od kolektora nie więcej, jak jedną tego samego znaku.

c) **Zatrzymywanie :**

- 11) Obciążenie prądnicy powinno być stopniowo zmniejszane przez kolejne wyłączanie odbiorników, przyczem zapomocą opornika wzbudzania zmniejszamy napięcie na zaciskach prądnicy,
- 12) wszystkie wyłączniki powinny być wyłączone a ręczki oporników znajdować się na odpowiednim kontakcie z chwilą gdy prądnica nie jest wzbudzona i nie pracuje.

### **Silniki elektryczne.**

Budowa silników elektrycznych niczem się nie różni od budowy prądnic, gdyż każda prądnica może być użyta jako silnik, o ile będziemy doprowadzać do jej uzwojenia twornikowego i elektromagnesów prąd z innego źródła. Podczas przepływu prądu po uzwojeniu twornika, magnesy działają z pewną siłą na te uzwojenia i powodują ich wirowanie; kosztem więc pracy prądu elektrycznego możemy otrzymać pracę mechaniczną, o ile wał, na którym osadzony jest twornik, połączymy z jakąś obrabiarką, bębнем windy i t. p. Przy rozpatrywaniu pola magnetycznego znaleźliśmy, że magnes działa na przewodnik z prądem z siłą proporcjonalną do gęstości linii magnetycznych  $B$ , do długości przewodnika  $l$  i do natężenia prądu  $J$ :

$$F = B l J$$

(Wzór ten stosuje się do tego wypadku, gdy przewodnik jest prostopadły do kierunku strumienia mag-

netycznego); przyczem kierunek tej siły został określony na zasadzie reguły lewej ręki. Dobrze jest zdać sobie dokładnie sprawę, skąd ta siła pochodzi; w tym celu rozpatrzmy pole 2-biegunowego magnesu, w którym znajduje się przewodnik. Jeżeli po przewodniku tym nie płynie prąd, to linie magnetyczne będą równoległe i nie wykazują żadnego działania na przewodnik (rys. 212a). Z chwilą jednak, gdy prąd zacznie płynąć, dokoła przewodnika wytwarza się nowe pole magnetyczne o kierunku tworzącym śrubę prawoskrętną z kierunkiem prądu. (Jeżeli wkręcać śrubę prawoskrętną w ten sposób, aby jej ruch postępowy był zgodny z kierunkiem prądu, to ruch obrotowy wskaże kierunek linii sił pola magnetycznego, wytworzonego przez ten prąd. Na rys. 212b prąd płynie od patrzącego za kartkę). Wskutek nowopowstałego pola, pierwotne pole magnesów zostaje odkształcone (rys. 212c). Pole to stara się powrócić do swej poprzedniej postaci i w tym celu usuwa przewodnik z prądem, t. j. przyczynę powodującą jego odkształcenie w kierunku wskazanym na rysunku strzałką. Siła, działająca na przewodnik, w celu usunięcia go z pola, jest dość znaczna, np. gdy  $B = 5000$  gausów,  $l = 50$  cm.,  $J = 40$  amperów  $= 4 JEM$ , to:

$$F = 5000 \cdot 50 \cdot 4 = 1004000 \text{ dyn} \cong 1 \text{ kg.}$$

**Moment obrotowy silnika.** Charakterystyczną wielkością dla silnika jest jego moment obrotowy. Przypomnijmy sobie tutaj w krótkości, co nazywamy momentem. Jeżeli mamy siłę  $F$  przyłożoną do ciała  $A$ , unieruchomionego w punkcie  $O$ , a więc mogącego posiadać ruch tylko obrotowy dokoła tego punktu, to skutek działania siły będzie zależny od odległości jej  $OA$  od punktu obrotu (rys. 213). Przypuśćmy, że pod działaniem tej siły ciało przeszło z położenia  $A$

do położenia  $A'$ , t. j. obrócone zostało o kąt  $\alpha$ . Droga, jaką ciało przebyło wynosi więc  $OA'\alpha = r\alpha$ , a praca, jaką siła przy tem wykonała:

$$A = Fr\alpha$$

Wielkość  $Fr$ , charakteryzującą działanie siły  $F$  nazywamy jej **momentem**. Widzimy więc, że praca wykonana przez siłę podczas obrotu ciała około pewnego stałego punktu jest równa momentowi tej siły pomnożonemu przez kąt, o jaki ciało zostało obrócone.

Jeżeli teraz mamy dwie siły  $F$  i  $F'$  równe i równoległe, lecz przeciwnie skierowane, t. zw. parę sił (rys. 214), to widzimy, że siły te ciała przesunąć nie mogą, lecz tylko wywołać jego ruch obrotowy około pewnego punktu  $O$ . Praca wykonana przez siłę  $F$  przy przesunięciu ciała o kąt  $\alpha$  wyniesie:

$$A = Fr\alpha$$

a praca siły  $F'$ :

$$A' = F'r\alpha$$

Obie siły razem wykonają więc pracę:

$$A_1 = A + A' = Fr\alpha + F'r\alpha$$

a ponieważ  $F = F'$ , więc:

$$A = 2Fr\alpha$$

Oznaczmy odległość między siłami  $F$  i  $F'$  przez  $a = 2r$ , to:

$$A = Fa\alpha$$

Widzimy więc, że praca pary sił równa jest iloczynowi jednej z tych sił przez odległość między nimi i przez kąt obrotu. Wielkość  $Fa$  nosi nazwę momentu  $M$  pary sił, więc praca:

$$A = M\alpha$$



Przejdźmy teraz do rozpatrywania sił działających na uzwojenie twornika w silniku. W uzwojeniu tem, tak samo jak w uzwojeniu twornika prądnicy prąd się rozdziela w ten sposób, że pod biegunem północnym płynie w jednym kierunku, pod biegunem południowym — w kierunku przeciwnym (rys. 215 b), wskutek tego odkształcenia pola będą tego rodzaju, że pod biegunem północnym powstanie siła  $F$ , działająca do góry, pod biegunem południowym — na dół (co łatwo sprawdzić zapomocą prawa lewej ręki). Mamy więc tutaj parę sił wywołującą obrót twornika. Praca tej pary sił przy jednym obrocie wyniesie:

$$A = M \cdot 2\pi = 2\pi M$$

gdzie  $M$  — moment obrotowy pary sił.

Z drugiej strony jednak wiemy, że praca wykonana w polu magnetycznym:  $A' = J\Phi$ , gdzie  $J$  natężenie prądu,  $\Phi$  — strumień magnetyczny.

Oznaczając liczbę par biegunów magnesnicy silnika przez  $p$ , a strumień wychodzący z każdego bieguna przez  $\Phi$ , otrzymamy ilość linii sił przeciętych przez jeden zwój podczas całkowitego obrotu twornika:  $2p\Phi$ ; jeżeli twornik posiada  $Z$  zwojów, to ogólna ilość linii magnetycznych przeciętych przez te zwoje podczas jednego obrotu twornika wynosi  $2p\Phi Z$ , a praca wszystkich zwojów przy jednym obrocie twornika:

$$A' = 2p\Phi Zi.$$

gdzie  $i$  — prąd przepływający przez jeden zwój; jeśli całkowity prąd, jaki pobiera silnik stanowi  $J$ , a ilość gałęzi równoległych uzwojenia twornika jest  $2a$ , to

$$i = \frac{J}{2a}, \text{ stąd:}$$

$$A' = 2p\Phi Z \cdot \frac{J}{2a} = \frac{p}{a} \cdot Z\Phi J.$$

ponieważ  $A = A'$ , więc:

$$2M\pi = \frac{\rho}{a} \cdot Z\Phi J,$$

a stąd:

$$M = \frac{\rho}{2a\pi} \cdot Z\Phi J.$$

Wielkości  $\rho$ ,  $a$ ,  $Z$ , są dla danego silnika stałe. Oznaczmy je przez  $K$ , wówczas:

$$M = K\Phi J.$$

Widzimy więc, że moment obrotowy silnika zależy tylko od strumienia magnetycznego wychodzącego z każdego bieguna i natężenia prądu pobieranego przez silnik, a nie zależy od ilości obrotów.

**Kierunek obrotu silnika.** Jeżeli teraz zastosujemy prawo Fleminga prawej ręki lub prawo prawej dłoni dla prądnic i prawo Fleminga lewej ręki lub lewej dłoni dla silnika elektrycznego i porównamy kierunki prądu w uzwojeniach twornikowych i kierunki obrotu twornika dla prądnic (rys. 215a) i dla silnika elektrycznego (rys. 215b) to zauważymy, że przy jednakowym kierunku strumienia magnetycznego magnesnicy i przy jednakowym kierunku obrotu twornika, prąd w uzwojeniu twornikowym silnika posiada kierunek przeciwny, niż w uzwojeniu twornikowym prądnic. Jeżeli w silniku zmienimy jednocześnie kierunek strumienia magnetycznego magnesnicy i kierunek prądu w uzwojeniu twornikowym (rys. 216a) na przeciwny, to kierunek obrotu silnika nie ulegnie zmianie, gdy natomiast zmienimy tylko kierunek strumienia magnetycznego magnesnicy (rys. 216b) lub kierunek prądu w uzwojeniu twornikowym (rys. 216c), kierunek obrotu silnika zmieni się na przeciwny.

**Ustawienie szczotek w silniku elektrycznym.** Jak widzimy z rys. 215 przy jednakowym kierunku strumienia magnetycznego magnesnicy, oraz przy jednakowym kierunku obrotu, będziemy mieli odmienne kierunki prądu w uzwojeniu twornikowym prądnicy i silnika elektrycznego. Wobec tego strumień poprzeczny powstający pod wpływem prądu płynącego po uzwojeniu twornika i odkształcający strumień magnesnicy w silniku elektrycznym będzie miał też kierunek przeciwny, niż w prądnicy (porównać rys. 196 b i 217), a więc linja neutralna zostanie jakby przekręcona o pewien kąt w kierunku przeciwnym biegowi silnika.

Celem uniknięcia iskrzenia szczotek, spowodowanego reakcją twornika, będziemy musieli w silniku elektrycznym przesunąć w tym samym kierunku razem z linią neutralną i szczotki.

Aby uniknąć każdorazowego przesuwania szczotek, ze zmianą natężenia prądu zasilającego silnik, stosujemy w silnikach, tak samo jak i w prądnicach, elektromagnesy kompensacyjne, lecz ustawiamy je w silniku w ten sposób, aby bieguny ich były zwrócone różnoimiennymi biegunami do najbliższych biegunów magnesnicy w kierunku obrotu twornika.

To samo dotyczy iskrzenia szczotek wskutek powstawania elektromotorycznej siły samoindukcji na linii neutralnej; celem uniknięcia tego iskrzenia należy szczotki przesunąć w kierunku przeciwnym biegowi silnika.

**Siła przeciwelektromotoryczna.** Przy biegu silnika elektrycznego uzwojenie twornikowe przecina strumień magnetyczny magnesnicy, wskutek czego, podobnie jak w uzwojeniu twornikowym prądnicy, powstawać

w nim będzie elektromotoryczna siła indukcji, której wielkość określimy ze wzoru:

$$E' = \frac{n}{60} Z \Phi \cdot 10^{-8} \text{ volt}$$

Kierunek tej elektromotorycznej siły indukcji w uzwojeniu twornikowym silnika, określony według prawa Fleminga prawej ręki, jest zawsze przeciwny względem kierunku elektromotorycznej siły źródła zasilającego prądem silnik elektryczny i dlatego nosi nazwę siły *przeciwelektromotorycznej*.

Siła przeciwelektromotoryczna powstaje pod wpływem strumienia magnetycznego wytwarzanego przez elektromagnesy. Przy normalnej szybkości silnika nieobciążonego wielkość siły przeciwelektromotorycznej  $E'$  jest bardzo bliska do napięcia  $V$  na jego zaciskach szczotkowych. Niech napięcie na zaciskach szczotkowych silnika  $V = 120$  volt, a siła przeciwelektromotoryczna  $E' = 119,75$  volt; jeżeli opór uzwojeń twornikowych  $r_t = 0,01$  oma, to prąd, jaki będzie płynął po tym uzwojeniu:

$$J_t = \frac{V - E'}{r_t} = \frac{120 - 119,75}{0,01} = \frac{0,25}{0,01} = 25 \text{ amp.}$$

Prąd ten wystarczy do wytworzenia takiego momentu obrotowego, który zrównoważy momenty oporowe tarcia; siły działające na twornik będą w równowadze, będzie się więc on obracał ze stałą szybkością. Przypuśćmy teraz, że silnik obciążyliśmy; moment obrotowy nie wystarczy do zrównoważenia momentów oporowych i silnik zwolni bieg, wskutek czego uzwojenia twornika będą w jednostkę czasu przecinały mniejszą liczbę linii magnetycznych magneśnicy i siła przeciwelektromotoryczna zmniejszy się ( $E' = k \Phi n$ ).

Niech siła przeciwelektromotoryczna wynosi teraz

$$E' = 118,5 \text{ volt, to : } J_1 = \frac{120 - 118,5}{0,01} = 150 \text{ amp.,}$$

widzimy więc, że przez uzwojenia twornika popłynie teraz większy prąd, a więc wzrośnie moment obrotowy. Ilość obrotów silnika zmniejszy się tylko o tyle, aby powstająca siła przeciwelektromotoryczna wpuszczała do uzwojeń twornika prąd wytwarzający moment obrotowy dostateczny dla pokonania zwiększonych momentów oporowych. Kiedy nastąpi stan równowagi, silnik będzie obracał się znowu ze stałą szybkością. Widzimy więc, że siła przeciwelektromotoryczna odgrywa rolę regulatora, regulującego dopływ prądu do uzwojeń twornika. Kiedy silnik zaczyna się dopiero obracać, to siła przeciwelektromotoryczna  $E' \cong 0$ , wówczas w rozpatrywanym przykładzie prąd dopływa-

$$\text{jący do uzwojeń twornika : } J_1 = \frac{V}{r_1} = \frac{120}{0,01} =$$

$= 12000 \text{ amp.}$  Tak wielki prąd uszkodziłby niewątpliwie uzwojenia twornika, nie obliczone na tak wielkie natężenie; aby zabezpieczyć silnik przed tak dużym prądem, włączamy szeregowo zmienny opornik  $R$  zwany opornikiem rozruchowym (rys. 218). Opornik rozruchowy powinien posiadać taki opór, aby przy całkowitym włączeniu go do obwodu przy rozruchu silnika (rączka  $M$  powinna wówczas znajdować się na kontakcie  $a$ ), przepuszczał przez uzwojenia twornika prąd wynoszący około 1,5 prądu normalnego (t. j. płynącego przy normalnej ilości obrotów).

Następnie, w miarę wzrostu ilości obrotów, a razem z tem i siły przeciwelektromotorycznej, wyłączamy opornik rozruchowy z obwodu, przesuwając rączkę  $M$  w kierunku, jak wskazuje strzałka na rysunku. W chwili

kiedy silnik rozwinie normalną szybkość, opornik zupełnie wyłączamy z obwodu, ustawiając rączkę  $M$  na kontakcie  $b$ .

**Budowa i własności silników elektrycznych.** Jak już wspomnieliśmy, silniki prądu stałego są o tej samej budowie, co i prądnice, różnią się tylko mniejszymi wymiarami (gdyż są budowane na mniejszą moc) i specjalnymi opornikami załączonymi do obwodu, jak to: opornik rozruchowy i opornik wzbudzania; często oporniki te są połączone w jeden opornik kombinowany. Silniki elektryczne prądu stałego tak samo jak i prądnice dzielimy na silniki:

- 1) ze wzbudzaniem obcem,
- 2) szeregowo,
- 3) bocznikowe,
- 4) szeregowo bocznikowe.

W praktyce najczęściej są spotykane silniki szeregowo i bocznikowe; silniki ze wzbudzaniem obcem i szeregowo-bocznikowe są mało używane i dlatego rozpatrywać ich nie będziemy.

**Szybkość obrotowa silnika.** Zmiana szybkości obrotowej silnika może być uskutecziona w dwojaki sposób: 1) przez wprowadzenie dodatkowego oporu do uzwojeń twornika, dzięki czemu następuje zmiana napięcia na zaciskach szczotkowych; 2) przez zwiększanie lub zmniejszanie natężenia prądu wzbudzania, przez co ulegnie zmianie strumień magnetyczny magnesnicy.

W pierwszym wypadku, przy zmianie napięcia na zaciskach szczotkowych, ulegnie zmianie różnica pomiędzy tym napięciem a siłą przeciwelektromotoryczną, a to pociąga za sobą zwiększenie lub zmniejszenie natężenia prądu dopływającego do uzwojeń twornika. W drugim wypadku, przy zmniejszaniu lub zwiększaniu

strumienia magnetycznego, ulega zmianie siła przeciw-  
elektromotoryczna, a więc różnica pomiędzy napięciem  
na zaciskach szczotkowych a tą siłą zwiększy się lub  
zmniejszy, co znowu pociągnie za sobą zmianę natężenia  
prądu dopływającego do uzwojeń twornika.

Ponieważ jednak pierwszy z tych sposobów jest  
bardzo nieekonomiczny, gdyż tracimy bezużytecznie  
dużą ilość energii na nagrzewanie się dodatko-  
wego opornika, który musi mieć dość znaczny opór  
w stosunku do oporu uzwojenia twornika, więc sto-  
sujemy go rzadko i na krótki przeciąg czasu. Czę-  
ściej natomiast stosuje się zmianę napięcia na zaciskach  
szczotkowych silnika przez doprowadzanie prądu z roz-  
maitych źródeł o różnym napięciu lub też przez zmianę  
strumienia magnetycznego magnesnicy, do czego służy  
specjalny opornik wzbudzania zbudowany podobnie do  
opornika rozruchowego.

W praktyce w silnikach elektrycznych bardzo często  
spotykamy takie rozmieszczenie opornika rozruchowego  
i opornika wzbudzania, że zapomocą przesuwania  
jednej rączki regulujemy wielkości oporów obu  
oporników jednocześnie. Takie połączenie opornika  
rozruchowego i wzbudzania nazywa się opornikiem  
kombinowanym.

W niektórych silnikach szeregowych osiągamy zmianę  
szybkości, zmieniając ilość amperozwojów w uzwoje-  
niu wzbudzania zapomocą przełącznika zwanego kon-  
trolerem. Jeżeli to uzwojenie jest podzielone na 4  
równe części, z których każda posiada  $z$  zwojów (rys.  
219), to przy natężeniu prądu zasilającego  $J$ , w wy-  
padku szeregowego połączenia wszystkich 4-ch części  
uzwojenia, ilość amperozwojów będzie  $4z$  (rys. 219a).  
W wypadku połączenia grupami (rys. 219b), ilość  
amperozwojów będzie:  $4z \cdot \frac{J}{2} = 2zJ$ . W wypadku

połączenia równoległego wszystkich części uzwojenia (rys. 219c) ilość amerozwojów będzie:  $4z \frac{J}{4} = zJ$ .

**Silnik szeregowy.** Na rysunku 220 jest pokazany układ montażowy silnika szeregowego z opornikiem wzbudzania i opornikiem rozruchowym, które są rozmieszczone osobno (rys. 220a) i z opornikiem kombinowanym (rys. 220b). W chwili rozruchu (rys. 220a) rączka opornika rozruchowego  $R_1$  — jest na kontakcie  $a$ , rączka opornika wzbudzania  $R_2$  — na kontakcie  $c$ . Przy stopniowym przesuwaniu rączki opornika  $R_1$  — do kontaktu  $b$ , silnik posiada małą szybkość obrotową, gdyż duży prąd, przepływający po uzwojeniach elektromagnesów, zwiększa strumień magnetyczny, a ten wywołuje znaczną siłę przeciwelektromotoryczną w uzwojeniu twornika. Chcąc zmniejszyć tę siłę należy zmniejszyć strumień magnetyczny; skutecznia się to przez odprowadzenie części prądu, przez odgałęzienie bezpośrednie do uzwojeń twornika. Aby prąd po tym rozgałęzieniu płynął należy zmniejszyć opór  $R_2$ , przesuwając rączkę na kontakt  $d$ .

Przedstawiony na rys. 220b opornik kombinowany składa się z 2-ch oporników: opornika rozruchowego  $AB$  i opornika wzbudzania  $DC$ . Jeden koniec uzwojenia wzbudzania jest przyłączony do nieruchomej sztabki  $KB$ , która doprowadza prąd do kontaktu  $B$  opornika, drugi koniec uzwojenia jest połączony przewodnikiem z kontaktem  $C$ . Ruchoma rączka  $M$  ślizga się po kontaktach opornika i obraca się dookoła nieruchomej osi  $O$ , do której jest dołączony przewód od źródła prądu. Kontakt  $S$  opornika jest kontaktem spoczynkowym dla rączki  $M$ , podczas kiedy silnik nie pracuje. Przy puszczeniu silnika w ruch przesuwamy rączkę  $M$  z kontaktu spoczynkowego  $S$  na kontakt  $A$ , wówczas prąd ze źródła przejdzie przez uzwojenie



twornikowe silnika, przez uzwojenie wzbudzania, sztabkę  $KB$ , cały opornik rozruchowy  $AB$  i przez rączkę  $M$  wróci do źródła.

Przy stopniowym przesuwaniu rączki  $M$  aż do kontaktu  $B$  wyłączamy stopniowo z obwodu opornik rozruchowy; silnik posiada wówczas jeszcze małą szybkość. Przesuwając rączkę  $M$  na kontakt  $D$ , włączamy cały opornik wzbudzania  $CD$  równ ległe do uzwojenia elektromagnesów. Przesuwając stopniowo rączkę  $M$  aż do kontaktu  $C$ , zmniejszamy w ten sposób natężenie prądu odgałęzionego do uzwojeń elektromagnesów, zwiększając przez to szybkość obrotową silnika. W chwili gdy rączka  $M$  będzie się znajdowała na kontakcie  $C$ , silnik będzie posiadał największą ilość obrotów przy danym obciążeniu.

Przy uruchamianiu silnika szeregowego, mamy znaczne natężenie prądu w uzwojeniu wzbudzania i w uzwojeniu twornikowym dzięki czemu będziemy mieli bardzo duży strumień magnetyczny magnesnicy, a więc silnik przy rozruchu będzie posiadał duży moment obrotowy ( $M = k \Phi J$ ). Dlatego też silnik szeregowy stosujemy w tych wypadkach gdy przy rozruchu wymagany jest duży moment obrotowy lub kiedy są możliwe wypadki przeciążenia silnika.

Przy biegu luzem silnika szeregowego, mały prąd, płynący przez uzwojenia twornikowe, wytwarza dość znaczną siłę do poruszania go. Siła przeciwelektromotoryczna jest wówczas prawie równa napięciu na zaciskach szczotkowych; aby wytworzyć tak znaczną siłę przeciwelektromotoryczną, musi się twornik nadzwyczaj szybko obracać w słabym polu elektromagnesów. To też silnik szeregowy bez obciążenia biegnie bardzo szybko. Przy wzroście obciążenia ilość obrotów silnika zmniejsza się, dzięki czemu maleje siła przeciwelektromotoryczna, co pozwala na zwiększenie się natężenia prądu w tworniku; ale prąd, pły-

nący przez twornik, przechodzi także przez uzwojenia magnesów, przez co zwiększa się strumień magnetyczny, a więc następuje wzrost siły przeciwelektromotorycznej i dalszy spadek ilości obrotów, dopóki siła przeciwelektromotoryczna nie zmniejszy się do tego stopnia, że będzie przepuszczać prąd niezbędny do pokonania oporów mechanicznych obciążenia silnika. Widzimy więc, że przy wzroście obciążenia następuje w tym silniku znaczny spadek szybkości obrotowej. Przy zmniejszaniu obciążenia, naodwrot, silnik będzie zwiększał ilość obrotów. Jeżeli zmniejszymy obciążenie poniżej pewnej granicy, to możemy wywołać tak wielką szybkość obrotową silnika, przy której może on ulec uszkodzeniu; wskutek tego silnik szeregowy może być stosowany tam, gdzie jest on stale obciążony, nprz. w tramwajach, windach, pompach i t. d. Nie należy stosować silnika szeregowego przy przekładni pasowej, gdyż w razie zerwania się lub zeskokczenia pasa może on rozwinąć szybkość niebezpieczną dla jego całości.

Z powyższego możemy określić własności silnika szeregowego w następujący sposób:

- 1) nie może pracować bez obciążenia,
- 2) przy zmniejszeniu obciążenia zwiększa szybkość obrotową,
- 3) przy rozruchu i przy przeciążeniu rozwija duży moment obrotowy, t. j. dużą siłę pociągową, co robi go przydatnym do wszelkich dźwignic.

### Z a d a n i e.

Silnik szeregowy 2-biegunowy posiada na zaciskach napięcie  $V = 110$  volt. Na obwodzie twornika znajduje się  $z = 630$  zwojów o łącznym oporze  $r_l = 0,088$  oma; opór uzwojenia wzbudzaniu  $r_m = 0,132$  oma.

Sprawność silnika wynosi  $\eta = 0,822$ , przy  $n = 900$  obrotów na minutę. Przy natężeniu prądu  $J = 68$  amp. i przy  $n = 900$  obrotów na minutę silnik jest zdolny podnosić ciężar o wadze  $Q = 43$  kg.

Obliczyć:

1) moc  $P$  jaką posiada silnik przy  $J = 68$  amperów,

2) szybkość z jaką silnik podnosi pionowo ciężar  $Q = 43$  kg.

3) siłę przeciwelektromotoryczną i strumień magnetyczny przy  $n = 900$  obrotów na minutę i  $J = 68$  amperów,

4) Straty na ciepło Joula w tworniku i w uzwojeniu wzbudzania,

5) Moment obrotowy silnika.

Moc pobrana przez silnik przy obciążeniu  $J = 68$  amperów:  $P = VJ\eta = 110 \cdot 68 \cdot 0,822 = 6148,6$  watów  $= 8,35$  KM.

Szybkość z jaką silnik podnosi ciężar obliczymy z następującego wzoru:

$$P = \frac{Qs}{t} = Qv$$

skąd szybkość:

$$v = \frac{P}{Q} = \frac{8,35 \cdot 75 \text{ kgm/sek.}}{43 \text{ kg.}} = 14,56 \text{ m/sek.}$$

Siła przeciwelektromotoryczna:

$$E = V - J(r_l + r_m) = 110 - 68(0,088 + 0,132) = 95 \text{ volt.}$$

Strumień magnetyczny obliczymy ze wzoru:

$$E = nz\Phi \cdot 10^{-8} \text{ volt.}$$

Mając na uwadze, że:  $n' = \frac{n}{60} = \frac{900}{60} = 15$

obrotów na sekundę możemy napisać:

$$\Phi = \frac{E \cdot 10^8}{Z n'} = \frac{95 \cdot 10^8}{630 \cdot 15} = 1000000 \text{ makswelli.}$$

Straty na ciepło Joule'a w uzwojeniu twornikowym i wzbudzania:

$$D = J^2 (r_l + r_m) = 68^2 \cdot 0,22 = 1017 \text{ watów.}$$

Moment obrotowy silnika:

$$M = \frac{Z \Phi \cdot J}{2\pi \cdot 10^8} = \frac{630 \cdot 10^6 \cdot 68}{2 \cdot 3,14 \cdot 10^8} = 68 \text{ dżauli}$$

**Silnik bocznikowy.** Na rys. 221 jest pokazany układ montażowy silnika bocznikowego z opornikiem wzbudzania i opornikiem rozruchowym, rozmieszczonymi osobno (rys. 221a) i opornikiem kombinowanym (rys. 221b). W chwili rozruchu rączkę opornika rozruchowego  $R_1$  przesuwamy z kontaktu spoczynkowego  $S$  na kontakt  $A$ , a rączkę opornika bocznikowego  $R_2$  pozostawiamy na kontakcie  $D$ , wyłączając go w ten sposób z obwodu. Prąd ze źródła pójdzie prosto do uzwojenia wzbudzania i przez opornik rozruchowy  $R_1$  do uzwojenia twornikowego, a następnie wróci do źródła.

Przesuwając rączkę opornika rozruchowego  $R_1$  stopniowo do kontaktu  $B$ , wyłączamy go w ten sposób z obwodu; silnik posiada wówczas małą szybkość obrotową. Dla zwiększenia tej szybkości przesuwamy stopniowo rączkę opornika bocznikowego  $R_2$  do kontaktu  $C$ .

W oporniku kombinowanym prócz opornika rozruchowego  $AB$  i opornika bocznikowego  $CD$ , znajduje

się jeszcze dodatkowy opornik  $EF$ , zadanie którego polega na stopniowym zmniejszaniu natężenia prądu w uzwojeniu wzbudzania podczas zatrzymania silnika.

Ponieważ uzwojenie elektromagnesów silnika bocznikowego posiada dużą ilość cienkich zwojów, więc w chwili przerywania prądu, powstaje w nich znaczna siła elektromotoryczna samoindukcji, która wywołuje iskrę między ostatnim kontaktem i rączką opornika. Chcąc otrzymać niedużą siłę elektromotoryczną samoindukcji należy natężenie prądu w uzwojeniu wzbudzania stopniowo zmniejszać do czego właśnie służy ten dodatkowy opornik  $EF$ .

Jeżeli przesuniemy rączkę opornika kombinowanego z kontaktu spoczynkowego  $S$  na kontakt  $E$ , to prąd ze źródła przejdzie do uzwojenia wzbudzania, potem przez sztabkę kontaktową  $FC$ , dodatkowy opornik  $FE$  i wróci do źródła.

Przesuwając stopniowo rączkę opornika do kontaktu  $F$ , doprowadzamy natężenie prądu w uzwojeniu wzbudzania do maksymalnej wartości, a w uzwojeniu twornikowym prąd przechodzi przez cały opornik rozruchowy  $AB$  i wraca do źródła. Silnik zaczyna się wówczas obracać.

Jeżeli przesuniemy rączkę opornika stopniowo na kontakty  $BC$ , wówczas prąd będzie szedł w obwodzie uzwojenia twornikowego, omijając opornik rozruchowy, a do obwodu uzwojenia wzbudzania zacznie wchodzić przez opornik bocznikowy  $CD$ . Przesuwając stopniowo rączkę opornika jeszcze dalej od kontaktu  $C$  w kierunku  $D$ , będziemy zwiększać szybkość obrotową silnika.

W chwili zatrzymania się silnika odprowadzamy rączkę opornika dodatkowego na kontakt  $EF$ , wówczas prąd w uzwojeniu twornikowym będzie przerywany, a w uzwojeniu wzbudzania będzie stopniowo malał,

dzięki czemu szybkość obrotowa silnika będzie się stopniowo zmniejszała.

Natężenie prądu w uzwojeniu wzbudzenia wynosi:

$$J' = \frac{V}{r_m}$$

wielkość więc strumienia magnetycznego magnesnicy  $\Phi$  jest wielkością stałą. Ze zmianą obciążenia silnika  $\Phi$  i  $V$  pozostają bez zmiany, a zmienia się jedynie  $J'$ , wobec tego szybkość obrotowa silnika zależeć będzie jedynie od prądu przepływającego przez uzwojenia.

Jeżeli do pewnej granicy będziemy zwiększać obciążenie silnika (tak jednak by go nie przeciążyć), to ilość obrotów jego zmniejszy się; równocześnie jednak ze zmniejszeniem ilości obrotów, ilość linii magnetycznych przecinanych przez uzwojenia twornika w jednostkę czasu ulegnie także zmniejszeniu, a wskutek tego zmaleje siła przeciwelektromotoryczna i zacznie płynąć większy prąd przez uzwojenia twornikowe.

Dzięki tym dwom czynnikom przy zmianie obciążenia szybkość obrotowa silnika bocznikowego zostaje prawie stałą, dlatego też silnik ten jest najczęściej używany do uruchomienia transmisji i obrabiarek, gdzie zachodzą częste zmiany obciążenia, a wymagany jest równy bieg silnika.

Z powyższego możemy określić własności silnika bocznikowego w następujący sposób:

- 1) może pracować bez obciążenia t. j. luzem,
- 2) ze zwiększeniem obciążenia do określonej granicy zmniejsza swą szybkość w niewielkim stopniu,
- 3) nie znosi przeciążenia.

Reasumując powyższe własności silnika szeregowego i bocznikowego, możemy powiedzieć, że najodpowiedniejsze zastosowanie silnik szeregowy znajduje tam,

gdzie są wymagane duże momenty obrotowe przy małej szybkości obrotowej i gdzie są nieuniknione przeciążenia, natomiast silnik bocznikowy tam — gdzie jest wymagana stała szybkość obrotowa i gdzie możliwość przeciążenia nie zachodzi.

### Z a d a n i e.

Obliczyć natężenie prądu w tworniku bocznikowego silnika elektrycznego o mocy  $P = 5$  KM., jeżeli napięcie na jego zaciskach szczotkowych wynosi  $V = 100$  volt, opór uzwojenia wzbudzenia  $r_m = 80$  omów a współczynnik sprawności  $\eta = 0,82$ .—

Moc prądu dopływającego do zacisków szczotkowych silnika:

$$P = \frac{736.5}{0,82} = 4487 \text{ watów.}$$

Natężenie prądu dopływającego do zacisków szczotkowych silnika:

$$J_z = \frac{4487}{100} = 44,87 \text{ ampera.}$$

Natężenie prądu w uzwojeniu wzbudzenia:

$$J_m = \frac{100}{80} = 1,25 \text{ ampera.}$$

Natężenie prądu w uzwojeniu twornikiem:

$$J_t = J_z - J_m = 44,87 - 1,25 = 43,62 \text{ ampera.}$$

**Silniki prądu zmiennego.** Silniki elektryczne prądu zmiennego mogą być zasilane prądem jednofazowym lub trójfazowym i zależnie od budowy i zasady działania mogą być:

1. **Silniki synchroniczne**, których budowa nie różni się niczem od budowy prądnic prądu zmiennego. W silnikach takich powstaje moment obrotowy, który zmienia swój kierunek tak często, jak wielka jest częstotliwość prądu zasilającego. Gdyby silnik posiadał niedużą masę, to pod wpływem tego zmiennego momentu otrzymałby ruch wahadłowy, wobec jednak dużej masy, a zatem dużej bezwładności, zachodzą w nim tylko drgania niewidoczne dla oka. Do uruchomienia silnika synchronicznego należy użyć silnika pomocniczego dopóki jego wirnik (magneśnica) nie osiągnie takiej szybkości, że zmiana biegunów pod zwojami twornika będzie się odbywać jednocześnie (synchronicznie) ze zmianą kierunku prądu w tych zwojach. Wówczas moment obrotowy silnika synchronicznego będzie posiadał stały kierunek i silnik pomocniczy, jako zbyteczny, zostaje wyłączony. Silnik synchroniczny nie może być przeciążony, gdyż wypada z synchronizmu i zatrzymuje się, natomiast przy normalnem obciążeniu zachowuje nadzwyczaj równy bieg.

W praktyce są stosowane silniki synchroniczne o mocy nieprzekraczającej 0,25 KM. np. do wentylatorów i innych instalacji domowych.

2. **Silniki asynchroniczne**. Silniki tego rodzaju noszą również nazwę silników indukcyjnych, gdyż posiadają podczas pracy obciążenie indukcyjne.

Rozpatrzmy tutaj budowę i własności tylko trójfazowego silnika asynchronicznego.

Nieruchoma część (stójnik) tego silnika jest podobna do nieruchomego twornika prądnic prądu zmiennego, z tą różnicą, że mamy w tym wypadku nie jedno, lecz trzy jednakowe uzwojenia, zasilane prądem trójfazowym. Stójnik odgrywa rolę magneśnicy, wytwarzającej



pod wpływem prądu zmiennego (trójfazowego), przepływającego przez jego uzwojenia, wirujące pole magnetyczne. Część ruchoma czyli wirnik ma zupełnie odmienną budowę i stanowi twornik silnika. Składa się on z żelaznego cylindra  $A$ , nasadzonego na wał  $BC$  (rys. 222). Cylinder żelazny zmniejsza opór obwodu magnetycznego pomiędzy biegunami wirującego pola magnetycznego (stójnika), zwiększając w ten sposób wielkość strumienia magnetycznego pomiędzy temi biegunami. W celu zmniejszenia strat na prądy wirowe Foucault'a cylinder nie jest masywny, a składa się z szeregu cienkich krążków blaszanych. Na powierzchni tego cylindra jest ułożone uzwojenie zwarte na krótko. Silnik ten nie posiada ani kolektora, ani pierścieni, ani szczotek. Prąd zmienny w uzwojeniu stójnika wytwarza wirujący strumień magnetyczny przecinający zwoje wirnika, dzięki czemu powstają w nich prądy indukcyjne.

Oddziaływanie wirujących biegunów magnetycznych stójnika na prądy indukcyjne w uzwojeniu twornika rozpatrzmy na następującym przykładzie (rys. 223). Jeżeli pręt  $A$  znajduje się w strumieniu magnetycznym wytworzonym przez biegun magnetyczny  $N$  i jeżeli biegun porusza się w kierunku strzałki  $B$ , to według prawa prawej dłoni w tym pręcie powstanie prąd indukcyjny  $J$ , o kierunku wskazanym na rysunku. Na mocy prawa lewej dłoni możemy określić kierunek, w którym będzie się posuwał pręt z prądem pod wpływem strumienia magnetycznego bieguna  $N$ ; kierunek ten wskazuje strzałka  $C$ .

Widzimy z tego, że wirujący strumień magnetyczny ciągnie za sobą uzwojenia wirnika, a więc razem z nim i sam wirnik. Wirnik jednak nie może obracać się z taką samą szybkością, co strumień magnetyczny, gdyż jego uzwojenia przecinałyby wciąż jednakowy strumień i prąd indukcyjny nie powstałby w nich, a więc nie byłoby

siły poruszającej. Dlatego też pomiędzy liczbą obrotów na minutę strumienia magnetycznego i wirnika istnieje różnica zwana poślizgiem, która waha się około 5% ilości obrotów na minutę.

Przy obciążeniu silnika szybkość wirnika zmniejsza się, wskutek czego uzwojenie jego przecina większy strumień magnetyczny i następuje wzrost prądu indukcyjnego; strumień magnetyczny silniej przyciąga uzwojenie, poślizg się zmniejsza i silnik nabiera większej ilości obrotów; widzimy więc, że silnik asynchroniczny pokonuje sam obciążenie. Jeżeli jednak obciążenie będzie tak duże, że poślizg dojdzie do 50%, to, przy dalszym zwiększeniu obciążenia, silnik stanie.

Własności silnika asynchronicznego są bardzo podobne do własności silnika bocznikowego.

3. **Silniki kolektorowe** posiadają twornik zbudowany identycznie, jak w silnikach prądu stałego i, jak wskazuje nazwa, prąd zmienny zostaje doprowadzany do wirujących elektromagnesów przez szczotki ślizgające się po kolektorze. Tym samym prądem zasilane są uzwojenia twornika, tak że jednocześnie ze zmianą kierunku prądu w tworniku, następuje zmiana jego kierunku w elektromagnesach. Silniki te są mało używane w praktyce.

**Obsługa silników elektrycznych.** a) **Puszczanie w ruch.** Przy puszczeniu w ruch silnika musimy wykonać te same czynności, co i przy puszczeniu w ruch prądnic. Prócz tego musimy dokładnie zbadać, czy:

1) oporniki rozruchowe i wzbudzenia (regulator szybkości) są włączone do obwodu prawidłowo.

b) **Podczas pracy.** 1) Przy uruchamianiu opornik rozruchowy powinien być wyłączany stopniowo, po-

czem zapomocą opornika wzbudzania należy doprowadzić szybkość silnika do normalnej wielkości.

2) Przy normalnem obciążeniu silnika, szczotki muszą być ustawione w ten sposób, żeby iskrzenie usunąć.

3) Należy uważać na wskazania woltomierza, załączonego równolegle do zacisków szczotkowych silnika, oraz na wskazania amperomierza, wskazującego obciążenie. Przy zmianie napięcia na zaciskach szczotkowych, należy zapomocą opornika wzbudzania prądnicy doprowadzić napięcie do normalnej wartości.

4) Jeżeli zmiana obciążenia powoduje iskrzenie szczotek, to szczotki muszą być przesunięte na nowe położenie, przy którym iskrzenia nie będzie.

5) Jeżeli chcemy obejrzeć jakąkolwiek szczotkę, to nie należy odciągać od kolektora więcej niż jedną.

6) Należy zwracać uwagę, żeby wszystkie części silnika nie były zbyt nagrzane.

c) **Przy zatrzymaniu.** 1) Zatrzymanie silnika powinno być uskutecznione tylko zapomocą opornika rozruchowego, który należy wyłączać nie stopniowo, a możliwie szybko.

2) Zatrzymanie silnika nie powinno być uskuteczniane zapomocą wyłączników, przerywających obwód prądu zasilającego silnik.

## **Transformatory.**

Zadaniem transformatorów jest przetwarzanie pracy prądu jednego napięcia na pracę prądu innego napięcia.

Każdy transformator składa się z 2-ch niezależnych i dobrze od siebie izolowanych uzwojeń, z których jedno nosi nazwę uzwojenia pierwotnego, a drugie — wtórne, oraz z obwodu magnetycznego, wspólnego dla obu uzwojeń.

Oba uzwojenia transformatora mogą być nawinięte na 2-ch oddzielnych rdzeniach, połączonych ze sobą zworami (rys. 224a) lub na wspólnym rdzeniu bezpośrednio jedno na drugim (rys. 224b). Obwód magnetyczny transformatora może być całkowicie zamknięty w żelazie (rys. 224a i b), wówczas transformator nazywamy transformatorem z obwodem magnetycznym zamkniętym, lub też może być częściowo zamknięty w żelazie, a częściowo w powietrzu (rys. 224c), wówczas transformator nazywamy transformatorem z obwodem magnetycznym otwartym.

Transformator z obwodem magnetycznym otwartym posiada mniejszy strumień magnetyczny, niż transformator z obwodem magnetycznym zamkniętym, o tej samej ilości zwojów uzwojenia pierwotnego, o jednakowym skutecznym natężeniu prądu zasilającego uzwojenie pierwotne, oraz o jednakowym poprzecznym przekroju rdzenia żelaznego.

Ponieważ we wszystkich trzech rodzajach transformatorów przedstawionych na rys. 224, strumień magnetyczny wytworzony przez prąd zasilający uzwojenie pierwotne całkowicie przenika uzwojenie wtórne, oba więc uzwojenia transformatora posiadają największy współczynnik indukcji wzajemnej,  $M = K \sqrt{L_1 \cdot L_2}$ , a więc i największy współczynnik sprzężenia  $K \cong 100\%$ .

Dla zmniejszenia strat w transformatorach na prądy wirowe Foucault'a i na histerezę, rdzeń i zwory składają się z izolowanych pomiędzy sobą cienkich arkuszy blachy żelaznej lub z cienkich drutów żelaznych.

Do uzwojenia pierwotnego transformatora doprowadzamy prąd zmienny z prądnicy  $Z$  (rys. 225). Prąd ten wywołuje zmienny strumień magnetyczny w rdzeniu żelaznym. Wywołany strumień zmienia się tak jak prąd, t. j. wzrasta w pewnym kierunku, osiąga maximum, poczem zaczyna opadać do zera, następnie

zmienia kierunek na odwrotny i znowu wzrasta, a po osiągnięciu maximum spada do zera i t. d. Ten zmienny strumień przecina zwoje obwodu wtórnego i wywołuje w nich siłę elektromotoryczną, pod wpływem której w zwojach tych powstaje prąd.

Jeżeli transformator jest nieobciążony, t. j. obwód wtórny jest przerwany, to w obwodzie pierwotnym mimo to prąd płynie. Prąd ten jest bardzo słaby, ponieważ strumień magnetyczny wzbudza w tym obwodzie znaczną siłę elektromotoryczną, skierowaną przeciwko prądowi i hamującą jego przepływ. Po włączeniu odbiornika do obwodu wtórnego, powstaje w nim prąd wtórny o kierunku takim, że osłabia strumień magnetyczny; wskutek tego siła elektromotoryczna w obwodzie pierwotnym maleje i może do niego dopływać większy prąd. Włączenie następnego odbiornika do obwodu wtórnego, osłabia jeszcze więcej strumień magnetyczny, a więc następuje dalszy wzrost prądu w uzwojeniu pierwotnym i t. d. Widzimy więc, że regulacja dopływu prądu do transformatora odbywa się przez samo załączanie odbiorników. Zaznaczyć należy, że nawet w obciążonym transformatorze siła elektromotoryczna w uzwojeniu pierwotnym nie wiele się różni od napięcia na końcówkach tego uzwojenia, gdyż nieznaczna zmiana siły elektromotorycznej przy małym oporze tego uzwojenia powoduje dużą zmianę w natężeniu prądu.

**Spółczynnik transformacji i współczynnik sprawności transformatora.** Rozpatrzmy transformator nieobciążony. Pod wpływem prądu płynącego po uzwojeniu pierwotnym, powstaje zmienny strumień magnetyczny, który przenika to uzwojenie i wywołuje w każdym jego zwoju siłę elektromotoryczną indukcji:

$$E'_t = \frac{\Phi_0 - \Phi_t}{t_0 - t} 10^{-8} \text{ wolt.}$$

Wszystkie zwoje znajdują się w jednakowych warunkach, więc powstawać w nich będzie jednakowa siła elektromotoryczna. Jeżeli uzwojenie to posiada  $Z_1$  zwojów, to ogólna siła elektromotoryczna  $E_1 = Z_1 \cdot E'_1$ , przyczem jest ona prawie równa napięciu na końcówkach uzwojenia:  $V_1 \cong E_1$ . Ponieważ uzwojenie wtórne jest nawinięte na tym samym rdzeniu, można przyjąć, że wszystkie linie sił strumienia magnetycznego przecinają go, powstanie więc w każdym zwoju tego uzwojenia siła elektromotoryczna taka sama, jak w zwojach pierwotnych,  $E''_1 = E'_1$ . Jeżeli uzwojenie to posiada  $Z_2$  zwojów, to ogólna siła elektromotoryczna  $E_2 = Z_2 \cdot E''_1 = Z_2 \cdot E'_1$ , przyczem w tym wypadku zupełnie ściśle:  $E_2 = V_2$  (przy obciążeniu transformatora wzór ten będzie tylko w przybliżeniu słusznym).

Z dwóch wzorów:  $E_1 = Z_1 \cdot E'_1$  i  $E_2 = Z_2 \cdot E'_1$  utwórzmy

proporcję, to: 
$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{Z_2 \cdot E'_1}{Z_1 \cdot E'_1} = \frac{Z_2}{Z_1} \cong \frac{V_2}{V_1}$$

ru tego wynika, że stosunek napięć na zaciskach uzwojeń wtórnego i pierwotnego jest równy w przybliżeniu stosunkowi ilości zwojów w tych uzwojeniach. Przykład: napięcie na zaciskach uzwojenia pierwotnego  $V_1 = 120$  wolt, ilość zwojów  $Z_1 = 12$ . W uzwojeniu tym powstaje siła elektromotoryczna  $E_1 \cong V_1 = 120$

wolt, na każdy zwój wypada więc:  $E'_1 = \frac{120}{12} = 10$  wolt.

Niech uzwojenie wtórne posiada zwojów  $Z_2 = 4$ , to w każdym z nich powstanie siła elektromotoryczna  $E'_2 = E'_1 = 10$  wolt., a ogólna siła elektromotoryczna w tym uzwojeniu:  $E_2 = 4 \cdot 10 = 40$  wolt. Stąd:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{120}{40} = \frac{12}{4} = \frac{3}{1} \cong \frac{V_2}{V_1}$$

Stąd wynika, że zapomocą transformatora możemy dowolnie zwiększać lub zmniejszać napięcie na zaciskach uzwojenia wtórnego, dobierając odpowiednio ilości zwojów obu uzwojeń. Stosunek ilości zwojów uzwojenia wtórnego do ilości zwojów uzwojenia pierwotnego  $\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)$  nazywamy współczynnikiem **transformacji** lub **przekładnią**.

Jeżeli obciążymy transformator, wówczas ilość energii elektrycznej w obwodzie wtórnym będzie prawie równa ilości energii elektrycznej w obwodzie pierwotnym, t. j.  $E_1 J_1 \cong E_2 J_2$ . Z tego otrzymamy następującą proporcję:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{J_1}{J_2} = \frac{Z_2}{Z_1}$$

Z równania tego widzimy, że skuteczne wartości natężenia prądu w uzwojeniu pierwotnym  $J_1$  i w uzwojeniu wtórnym  $J_2$  są odwrotnie proporcjonalne do liczby zwojów  $Z_1$  i  $Z_2$  tych uzwojeń.

W rzeczywistości ilość energii elektrycznej w obwodzie wtórnym jest nieco mniejszą niż ilość jej w obwodzie pierwotnym. Stosunek mocy prądu wtórnego

do mocy prądu pierwotnego:  $\eta = \frac{E_2 J_2}{E_1 J_1}$ , zwany **spół-**

**czynnikiem sprawności** transformatora, jest mniejszy od jedności i równa się w przybliżeniu 0,95 — 0,99. Ta strata energii elektrycznej w transformatorze spowodowana jest: a) nagrzewaniem się obu uzwojeń transformatora, b) prądami wirowymi Foucault'a i histerezą w rdzeniach i zworach transformatora.

Okazuje się, że współczynnik sprawności transformatora jest największy, kiedy straty w uzwojeniach są

równe stratom w rdzeniach i zworach i kiedy ciężar przewodników uzwojenia pierwotnego jest równy ciężarowi przewodników uzwojenia wtórnego.

**Przenoszenie energii elektrycznej na odległość.**  
Niech prądnicą o mocy 200 KM. i napięciu na zaciskach 500 volt dostarcza prąd do odległego budynku; natężenie prądu w przewodach łączących elektrownię z budynkiem będzie wówczas:

$$J = \frac{200 \cdot 736}{500} = 292 \text{ ampery.}$$

Jeżeli oporność przewodów łączących wynosi  $R$  omów, to strata mocy prądu w przewodach na ich nagrzewanie będzie:

$$R \cdot 292^2 \text{ watt} = R \cdot 85 \text{ kilowatt.}$$

Gdyby prądnicą dostarczała prąd nie o napięciu 500 volt, a 10000 volt, to w ten sposób natężenie prądu w przewodach zmniejszyłoby się do wielkości:

$$J_1 = \frac{200 \cdot 736}{10000} = 15,7 \text{ ampera.}$$

Przy tej samej oporności przewodów  $R$ , będziemy mieli stratę na ich nagrzewanie:

$$15,7 \cdot R \text{ watt} = 0,25 \cdot R \text{ kilowatt.}$$

Gdybyśmy się zgodzili mieć w przewodach te same straty co poprzednio, to moglibyśmy wziąć przewody o większej oporności, a więc z materiału gorszego lub o mniejszym poprzecznym przekroju, przez co znacznie zmniejszylibyśmy koszty instalacji.

Z tego widzimy, że daleko wygodniej jest przesyłać na odległość prąd o wysokim napięciu i małym natę-



zeniu. Jednak budowa prądnic o wysokim napięciu napotyka na poważne trudności ze względu na konieczność dobrego izolowania uzwojeń twornikowych. To też w praktyce nie buduje się prądnic prądu zmiennego o napięciu większem niż 15000 volt.

Zastosowanie transformatorów w tym wypadku pozwala przenosić energję elektryczną na odległość przy dogodnych warunkach.

Jeżeli prądnicą wytwarza prąd o napięciu 500 volt, to możemy go przekształcić na prąd o napięciu 10000 volt przy pomocy transformatora, którego uzwojenie wtórne posiada 20 razy więcej zwojów niż pierwotne (rys. 226):

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{Z_2}{Z_1}; \text{ stąd: } V_2 = \frac{V_1 \cdot Z_2}{Z_1} = 500 \cdot 20 = 10000 \text{ volt.}$$

Po doprowadzeniu do miejsca przeznaczenia, przy pomocy transformatora *B*, którego uzwojenie pierwotne posiada 20 razy więcej zwojów niż wtórne, możemy obniżyć z powrotem napięcie do 500 volt, a następnie przy pomocy transformatora *C* o przekładni 1 : 5 doprowadzić je do 100 volt.

Na stacji elektrycznej zasilającej posiadamy zazwyczaj źródło prądu zmiennego o małym napięciu, połączone z uzwojeniem transformatora potęgującego napięcie. Uzwojenie wtórne tego transformatora jest połączone z odprowadzającymi przewodami, których drugie końce załącza się do uzwojeń pierwotnych transformatora, znajdującego się na stacji elektrycznej odbiorczej i obniżającego napięcie. Do obwodu uzwojenia wtórnego tego transformatora są włączone odbiorniki.

Podobne urządzenie dla najdogodniejszego przeniesienia energii elektrycznej na odległość mamy w aparatach telefonicznych. Każdy aparat telefoniczny

posiada do tego celu transformator z obwodem magnetycznym otwartym zwany cewką indukcyjną. Cewka indukcyjna zwiększa około 8—20 razy napięcie i tyleż razy obniża natężenie prądu, wychodzącego na linię z aparatu telefonicznego nadawczego do odbiorczego. Cewka indukcyjna w aparacie telefonicznym służy nie tylko do dogodnego przenoszenia energii na odległość, lecz również do tego, by prąd płynący w obwodzie uzwojenia pierwotnego tej cewki nie przepływał przez uzwojenie elektromagnesu spolaryzowanego słuchawki, gdyż mógłby osłabić jego stały magnes.

### **Przetwornice.**

Rozpatrzone wyżej transformatory statyczne mogą być używane tylko dla przetwarzania prądów zmiennych i pulsujących na prądy zmienne; natomiast zapomocą tych transformatorów nie możemy osiągnąć:

- a) zmiany napięcia prądu stałego,
- b) przekształcenia prądu stałego na prąd zmienny lub odwrotnie,
- c) przekształcenia prądu zmiennego o pewnej częstotliwości na prąd zmienny o innej częstotliwości.

Z potrzebą rozwiązania tych zagadnień spotykamy się często w praktyce i używamy w tym celu transformatorów dynamicznych, zw. przetwornicami.

Przetwornice są to zespoły silników elektrycznych i prądnic, połączonych pomiędzy sobą mechanicznie. Zazwyczaj tworniki obu maszyn są osadzone na wspólnym wale, a niekiedy posiadają i wspólne wzbudzenie.

Prądem pierwotnym zasilamy silnik elektryczny, a prąd wtórny otrzymujemy z prądnicy prądu stałego lub zmiennego, których budowa jest przystosowana do napięcia i natężenia prądu zasilającego odpowiednie odbiorniki.

Spółczynnik sprawności przetwornicy jest mniejszy od współczynnika sprawności transformatora. Jeżeli współczynnik sprawności silnika jest 0,85 a prądnicę również 0,85, to współczynnik sprawności przetwornicy (zespołu) będzie równy iloczynowi tych 2-ch współczynników, t. j.  $\eta = 0,85 \cdot 0,85 = 0,72$ .

Na stacjach radiotelegraficznych *RKA* mamy przetwornice typu Marconi'ego o 2-ch uzwojeniach transformatorowych przetwarzających prąd stały o napięciu 24 volt na prąd stały o napięciu 1500 volt i 18 volt przy 2800 obrotach na minutę.

### **Cewka Ruhmcorff'a.**

**Cewka Ruhmcorff'a** jest transformatorem z obwo-  
dem magnetycznym otwartym, w którym do obwo-  
du uzwojenia pierwotnego jest włączone źródło prądu  
stałego *E*, klucz *K* i przerywacz elektromagnetyczny  
(rys. 227). Cewka Ruhmcorff'a przetwarza prąd pul-  
sujący o niskim napięciu na prąd zmienny o wyso-  
kim napięciu i dlatego znajduje ogromne zastosowa-  
nie w stacjach radiotelegraficznych. Rdzeń cewki  
o długości 8—10 razy większej od średnicy składa  
się z cienkich drutów żelaznych, izolowanych pomię-  
dzy sobą. Współczynnik transformacji w cewkach Ruh-  
corff'a używanych na stacjach radiotelegraficznych  
jest około 300, a w stacjach telegrafów przez ziemię  
około 10.

Jeżeli zapomocą klucza *K* zamkniemy obwód prądu  
w uzwojeniu pierwotnym cewki, to dzięki przerywa-  
czowi magnetycznemu prąd ten będzie pulsującym  
i będzie miał przebieg jak wskazano na rysunku 228.  
Podczas zamykania i otwierania prądu w uzwojeniu  
pierwotnym przez młoteczek *F* przerywacza, w obwo-  
dzie uzwojenia wtórnego będzie powstawać prąd  
zmienny. Przebieg prądu zmiennego w obwodzie

uzwojenia wtórnego, w zależności od położenia młoteczka  $F$  przerywacza jest przedstawiony na rys. 228. Z rysunku tego widzimy, że przy otwieraniu prądu w uzwojeniu pierwotnym, prąd indukcyjny uzwojenia wtórnego jest o natężeniu i napięciu o wiele większym, niż przy zamykaniu. Jest to spowodowane tem, że przy otwieraniu obwodu pierwotnego zachodzi szybciej zmniejszenie się natężenia prądu, niż jego wzrastanie przy zamykaniu, co wpływa na wielkość powstającej w obwodzie wtórnym siły elektromotorycznej indukcji.

Znaczny wpływ na wielkość prądu indukcyjnego w obwodzie wtórnym cewki posiada kondensator  $C$  równolegle załączony do śrubki kontaktowej  $D$  i młoteczka  $F$  przerywacza. Pojemność tego kondensatora jest dość znaczna (około 8 mikrofaradów). Jego zadanie jest następujące:

- a) zmniejszyć iskrę pomiędzy śrubką kontaktową  $D$  i młoteczką  $F$ , powstającą dzięki ekstra prądom otwarcia, które z powodu znacznej samoindukcji uzwojenia pierwotnego są bardzo duże. W ten sposób kontakty platynowe na śrubce  $D$  i młoteczku  $F$  mniej się niszczą.
- b) Przyspieszyć opadanie natężenia prądu przy przerywaniu obwodu oraz narastanie natężenia prądu przy zamykaniu obwodu uzwojenia pierwotnego, przez co w uzwojeniu wtórnym otrzymamy prąd indukcyjny o większym natężeniu.

Jeżeli pomiędzy zaciskami uzwojenia wtórnego włączymy iskiernik, składający się z 2-ch elektrod: rurki i talerzyka i do ich zacisków przyłączymy antenę i uziemienie (przedstawione na rys. 227 linjami nieciągłymi), wówczas cewka Ruhmcorff'a będzie odgrywała rolę stacji radiotelegraficznej nadawczej. Przy dłuższem lub krótszem naciskaniu klucza  $K$ , dzięki

dużemu napięciu pomiędzy elektrodami iskiernika będziemy otrzymywali dłuższy lub krótszy szereg iskier.

Jeżeli zwiększymy przerwę pomiędzy elektrodami, to zauważymy, że iskry będą przeskakiwać tylko w jedną stronę, gdyż napięcie, powstające przy zamykaniu prądu w uzwojeniu pierwotnem cewki, będzie za małe, aby przebić tę warstwę powietrza i iskry będą przeskakiwać tylko przy otwieraniu prądu, gdyż wówczas powstające pomiędzy elektrodami napięcie jest o wiele większe.

**Lampa katodowa.** Do niewielkich urządzeń stosowane są obecnie t. zw. prostowniki, przetwarzające prąd zmienny na prąd tętniący. Zasada działania prostowników polega na tem, że przepuszczają one prąd tylko w jednym kierunku. Najczęściej stosowanym w radjotechnice i telefonji prostownikiem jest lampa katodowa. Składa się ona z bańki szklanej (rys. 229), w której powietrze jest rozrzedzone do 0,00001 milimetra słupka rtęci. Do bańki są wtopione dwa końce *a*, *b* elektrody zw. **katodą K**; końce te nazewnętrz bańki są połączone z **baterją katodową** o napięciu od 4 — 110 volt. Anoda *A* w kształcie płytki lub cylindra, albo też 2-ch płytek, otaczających katodę, jest przyłączona do przewodnika *c*, wtopionego również w bańkę; drugi koniec tego przewodnika jest załączony do bieguna dodatniego źródła prądu stałego o napięciu 40 do 20000 volt, zw. **baterją anodową**. Biegun ujemny baterji anodowej jest połączony z biegunem ujemnym baterji katodowej (rys. 230). Elektryony wysyłane przez rozżarzoną katodę będą zubożętniały dodatni ładunek anody, a baterja anodowa stale będzie ten ładunek uzupełniać i dzięki temu w obwodzie zewnętrznym lampy powstanie prąd zwany **anodowym**. Prąd anodowy ma kierunek od bieguna dodatniego baterji anodowej

przez miliamperomierz  $mA$  do anody  $A$ , następnie wewnątrz lampy do katody  $K$  i kolejno do biegunów ujemnych baterji katodowej i anodowej.

W praktyce lampy katodowe są trójelektrodowe, gdyż mają pomiędzy anodą  $A$  i katodą  $K$  jeszcze siatkę  $S$ , połączoną zapomocą przewodnika  $d$  wtopionego do bańki i połączonego nazewnątrz z jednym zaciskiem źródła zmiennych potencjałów  $Z$ , którego drugi zacisk jest połączony z ujemnym biegunem baterji katodowej. Ujemny biegun baterji katodowej, czyli **baterji żarzenia** jest wspólnym punktem obwodów 3-ch elektrod lampy: obwodu **anodowego**, obwodu **siatki** i obwodu **katody**, czyli obwodu **żarzenia**.

Potencjał dodatni siatki pomaga anodzie w przyciąganiu elektronów od katody, prąd więc anodowy zwiększa wówczas swoje natężenie. Potencjał ujemny siatki odpycha elektrony, tak, że te w zmniejszonej ilości przedostają się przez jej otworki do anody, wskutek czego natężenie prądu anodowego osłabnie. Przez odpowiednią budowę lampy katodowej można sprawić, że małe zmiany potencjału siatki, wywołają bardzo duże zmiany natężenia prądu anodowego, dzięki temu lampa katodowa może być zastosowana jako **wzmacniacz** bardzo słabych prądów w aparatach odbiorczych radiotelegraficznych i telefonicznych.

Z drugiej strony widzimy, że prąd w obwodzie anodowym może płynąć przez lampę tylko w kierunku od anody do katody, nigdy odwrotnie. Wobec tego lampa katodowa może służyć jako prostownik prądu.

**Prostownik neonowy.** Przedstawiony na rys. 231 prostownik neonowy jest lampą katodową z dwoma anodami, a to w celu wykorzystania obu składowych części prądu zmiennego, w przeciwnym bowiem razie, t. j. przy jednej anodzie połowa prądu jest stracona

dla obwodu zewnętrznego. Do baterji katodowej o napięciu 6 volt są przyłączone końce *a*, *b* katody; końce *e*, *f* 2-eh elektrod anodowych są połączone nazewnątrz bańki ze źródłem prądu zmiennego. Obie anody są zakończone węglowemi cylindrami i rozdzielone kształtem bańki w ten sposób, że zwarcie prądu zmiennego między niemi wewnątrz bańki jest niemożliwe. Cała bańka jest wypełniona rozrzedzonym do kilkunastu milimetrów ciśnienia słupka rtęci gazem, zw. neonem, posiadającym własność łatwego jonizowania się. Katoda jest z drucika platynowego, pokrytego wewnątrz bańki dwutlenkiem baru ( $BaO_2$ ). Elektrony, wydzielane przez rozżarzoną katodę, bombardując rozrzedzony neon, jonizują go, dzięki czemu gaz ten staje się przewodnikiem.

Jeżeli pomiędzy zaciskami elektrod anodowych *e*, *f* będziemy mieli w przewodniku *ef* prąd zmienny, t. j. jeżeli potencjały punktów *e*, *f* (około 2000 volt) będą kolejno zmieniały swój znak, pozostając zawsze o znakach przeciwnych, a w punkcie *g* tego przewodnika będziemy mieli zawsze potencjał równy zeru, to wewnątrz bańki prąd wyjdzie od tej anody, która w danej chwili posiada potencjał dodatni, do katody i dalej przez katodę do obwodu zewnętrznego, gdyż drogą od katody do drugiej anody prąd wrócić nie może. Oznaczając pojedynczą strzałką jeden kierunek prądu, a podwójną strzałką kierunek prądu przeciwny zauważymy, że w obwodzie *b — d — p — c — g* będzie płynął prąd jednokierunkowy pulsujący, który w punkcie *g* rozgałęzi się na dwie części, przez co potencjał punktu *g* nie zostanie zmieniony.

W ten sposób prąd zmienny w przewodniku *ef* za pomocą wyżej opisanego prostownika przetworzyliśmy w prąd jednokierunkowy pulsujący, który będzie przepływał w obwodzie zewnętrznym prostownika do zacisków *cd*, pomiędzy którymi jest załączony odbiornik *p*.

Ten sam rezultat otrzymamy, jeżeli zamiast prostownika neonowego zastosujemy dwie lampy katodowe, połączone tak, jak pokazano na rys. 232.

**Prostownik elektrolityczny** (rys. 233) składa się z naczynia wypełnionego roztworem dwuwęglanu amonu  $[NH_4(CO_3)_2]$  i zanurzonych w nim 2-ch elektrod: żelaznej i aluminiowej. Działanie tego prostownika polega na tem, że na elektrodzie aluminiowej wydzielają się pewne sole, które prawie wcale nie przepuszczają prądu, tak, że może on płynąć tylko w kierunku od żelaza. Gdybyśmy włączyli taki prostownik do obwodu prądu zmiennego, który chcemy sprostować, aby naładować nim np. akumulator, to tylko połowa prądu wytworzonego przez prądnicę zostanie zużyta, reszta będzie stracona (rys. 234a). Chcąc wykorzystać w tym wypadku całkowity prąd, musielibyśmy włączyć do obwodu 4-ry takie prostowniki (rys. 234b). Oznaczając pojedynczą strzałką prąd płynący w jednym kierunku, a podwójną — w kierunku przeciwnym, zauważymy, że przez akumulatory będzie płynął prąd jednokierunkowy pulsujący.

## **Elektrochemia.**

Jak już wspomnieliśmy, rozpatrując przewodnictwo elektryczne, różnica pomiędzy przewodnictwem metali i elektrolitów polega na tem, że przy przewodzeniu prądu przez metale materia tych ostatnich nie bierze udziału w ruchu elektryczności, natomiast w elektrolitach ruch elektryczności związany jest z ruchem atomów danej materji. Elektrolitami, które nazywamy również przewodnikami drugiego rzędu są roztwory soli, kwasów i zasad, a również niektóre sole w stanie płynnym (roztopione). Sprawa przewodnictwa prądu przez elektrolity wyjaśnia się w następujący sposób:



rozczylnik, którym może być bądź to woda, bądź to alkohol, rozrywa molekuly na jony. Jonem będzie więc atom lub grupa atomów, posiadająca ładunek elektryczny. Jon naładowany elektrycznością ujemną zwiemy **anionem**, dodatnią — **kationem**.

Analogicznie do istnienia niepodzielnych cząsteczek materji czyli atomów, możemy sobie wyobrazić istnienie atomów elektryczności. W ten sposób w każdym atomie materji naładowanym ujemnie znajduje się pewna całkowita ilość atomów elektryczności (elektronów); w atomie naładowanym dodatnio będzie brak pewnej całkowitej ilości elektronów. Ilość elektronów połączonych z atomem materji (lub brak pewnej ich ilości) wiąże się z wartościowością atomu — jest jej równa.

Molekuly, pod wpływem rozczylnika, rozpadają się na jony dodatnie i ujemne. Suma ładunków dodatnich i ujemnych będzie równa. Elektrolit więc sam przez się nie wykazuje działania elektrycznego. Według istniejącej teorii, jony w elektrolicie znajdują się ciągle w ruchu; spotykające się jony różnych znaków łączą się w molekuly obojętne elektrycznie, ale na ich miejsce rozpadają się inne molekuly tak, że ilość jonów w danym roztworze jest stała. Stosunek ilości molekuł rozzerwanych do ilości wszystkich molekuł znajdujących się w roztworze nazywamy **stopniem dysocjacji**.

Jeżeli do elektrolitu zanurzymy dwie płytki metalowe połączone z biegunami źródła prądu, to w elektrolicie powstanie pole elektryczne, pod wpływem którego jony dodatnie posuwają się będą w kierunku płytki połączonej z biegunem ujemnym, ujemne — w kierunku płytki połączonej z biegunem dodatnim. Przy zetknięciu się z płytkami jony będą neutralizować się elektrycznie, a na płytkach będzie się wydzielać ich materja chemiczna.

Jeżeli weźmiemy różne elektrolity w ilości gramów równej ich ciężarowi atomowemu, to będą one zawierać

jednakową ilość atomów materji dajmy na to  $N$ . Każdy atom, jonizując się, będzie posiadał  $n$ , równe swej wartościowości, atomów elektryczności. Wobec tego rozmaite elektrolity wzięte w ilości gramowego równoważnika chemicznego, t. j. ilości gramów równej ciężarowi atomowemu podzielonemu przez wartościowość, będą posiadały tę samą ilość atomów elektrycznych, a więc każda gramo-cząsteczka różnych chemicznie materji posiada stały ładunek elektryczny. Ładunek ten równa się 96540 kulombów. Jeden kulomb elektryczności przeprowadzony przez elektrolit

wydzieli więc  $\frac{1}{96540}$  część gramo-cząsteczki danej ma-

terji, t. j.  $\frac{1}{96540} \cdot \frac{A}{n} = 0,00001036 \frac{A}{n} = m \text{ gr.}$

danej materji, gdzie  $A$  — ciężar atomowy, a  $n$  — wartościowość.

Ta ilość wydzielonej na elektrodach materji przez jeden kulomb elektryczności czyli przez 1 amper w ciągu jednej sekundy nazywa się **elektrochemicznym równoważnikiem**.

Jeżeli przez elektrolit przechodzi prąd  $J$  amp. w czasie  $t$  sekund, to ilość wydzielonej materji będzie:

$$M = 0,00001036 \frac{A}{n} Jt = m Jt$$

Ponieważ przy wszystkich reakcjach chemicznych jedna materja zastępuje drugą w ilości proporcjonalnej

do wartościowości  $\left(\frac{A}{n}\right)$ , wobec tego poprzednie rów-

nanie stosuje się i w tym wypadku, gdy na elektrodach wydzielają się ciała będące rezultatem reakcji wtórnych.

Przytoczone tutaj zależności między ilością przeprowadzonej elektryczności przez elektrolit i ilością wydzielonego ciała na elektrodach zostały ustalone przez Faraday'a.

### Ogniwa elektryczne.

**Zjawisko Volty.** W końcu XVIII wieku Volt'a wykonywując swe doświadczenia, do których pobudką posłużyło spostrzeżenie, uczynione przez Galvani'ego na preparacie żaby, odkrył, że elektryzacja ciał zachodzi nie tylko przy pocieraniu, lecz i przy zetknięciu chemicznie różnych przewodników pierwszej klasy. Przytem Volt'a stwierdził, że jeden z tych przewodników elektryzuje się dodatnio, drugi ujemnie. Tłumaczy się to tem, że elektrony swobodne z ciała o większej ich gęstości przechodzą do ciała o mniejszej gęstości.

Przewodniki pierwszej klasy Volta zestawił w takim porządku, że każdy z nich elektryzuje się dodatnio w zetknięciu z następnym, a ujemnie z poprzednim. Jest to t. zw. szereg napięcia Volt'y:

Cynk	(Zn)	>	0,21	wolt
Ołów	(Pb)	>	0,099	„
Cyna	(Sn)	>	0,313	„
Żelazo	(Fe)	>	0,146	„
Miedź	(Cu)	>	0,233	„
Platyna	(Pt)	>	0,113	„
Węgiel	(C)	>		

W powyższej tabeli podajemy różnicę potencjałów powstającą przy normalnej temperaturze 15°C pomiędzy przewodnikami szeregu Volty. Różnice te nie zależą od rozmiarów przewodników, ani od powierzchni ich zetknięcia, zależą natomiast od ich rodzaju i temperatury. Przytem różnica potencjałów pomiędzy dwoma dowolnymi przewodnikami tego sze-

regu równa się sumie różnicy potencjałów powstających przy zetknięciu poszczególnych par przewodników zawartych między niemi, np. jeżeli zetkniemy cynk z miedzią, to różnica potencjałów między niemi będzie:

$$Zn/Cu = Zn/Pb + Pb/Sn + Sn/Fe + Fe/Cu.$$

Jako wniosek z tego mamy, że w szeregu złożonym z jakichkolwiek przewodników pierwszej klasy, różnica potencjałów pomiędzy skrajnemi zależy jedynie od rodzaju tych ostatnich, a więc w wypadku, gdy przewodniki skrajne są jednakowe, różnica ta równa się zeru. Dlatego też wyłącznie z przewodników pierwszej klasy nie można zbudować źródła energii elektrycznej.

**Ogniwa galwaniczne.** Przewodniki pierwszej klasy przy zetknięciu z elektrolitami nie okazują takiej prawidłowości. O ile więc pomiędzy niemi umieścimy przewodnik 2-jej klasy, np. do naczynia z roztworem soli kuchennej (*NaCl*) zanurzymy 2 płytki — miedzianą i cynkową, to na końcach przewodnika łączącego te płytki (rys. 235) będziemy mieli różnicę potencjałów.

Oznaczmy rodzaj metalu przewodnika łączącego płytki przez *M*; różnica potencjałów pomiędzy końcami tego przewodnika jest równa s mie algebraicznej różnic potencjałów pomiędzy parami poszczególnych przewodników tego szeregu, czyli:

$$V = M/Cu + Cu/NaCl + NaCl/Zn + Zn/M$$

Ponieważ:

$$Zn/M + M/Cu = Zn/Cu$$

więc:

$$V = Cu/NaCl + NaCl/Zn + Zn/Cu = 0,84 \text{ volt.}$$

Takie źródło elektryczności, w którym prąd otrzymuje się dzięki energii chemicznej, nazywa się **ogniwem galwanicznym**.

Przewodniki pierwszej klasy tego ogniwa nazywamy **elektrodami**, przewodnik drugiej klasy nazywamy **elektrolitem**. Do umocowania przewodnika łączącego elektrody ogniwa służą umieszczone na nich zaciski — będą one biegunami ogniwa. Elektrode połączone z biegunem dodatnim nazywamy **anodą**, połączone z biegunem ujemnym — **katodą**.

Obwód zewnętrzny ogniwa składa się z przewodników łączących bieguny, wewnętrzny — z elektrody ujemnej, elektrolitu i elektrody dodatniej.

Początkowo różnicę potencjałów na biegunach ogniwa otrzymujemy dzięki elektryzacji przy zetknięciu z elektrolitem chemicznie różnych elektrod. Następnie różnica ta jest podtrzymywana przez siłę elektromotoryczną, powstającą dzięki procesom chemicznym, zachodzącym w ogniwie. Widzimy więc, że różnica potencjałów na zaciskach ogniwa galwanicznego zależy jedynie od składu chemicznego elektrod i elektrolitu i ich temperatury; nie zależy natomiast od poprzedniego stanu elektrycznego elektrod i elektrolitu i rodzaju przewodnika łączącego bieguny ogniwa.

Przekształcenie w ogniwach energii chemicznej w pracę prądu elektrycznego jest procesem nieodwracalnym czyli zapomocą ogniwa nie możemy pracy prądu elektrycznego przekształcić w energię chemiczną. Natomiast proces odwracalny będziemy mieli w t. zw. ogniwach wtórnych, czyli akumulatorach, które będziemy następnie rozpatrywali.

Jak z powyższego wynika, zasada ogniwa galwanicznego sprowadza się do 2-ch czynności: elektryzacji przy zetknięciu chemicznie różnych przewodników i przekształcenia się energii chemicznej tych przewodników w energię elektryczną.

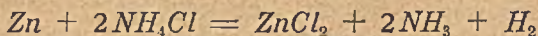
**Polaryzacja ogniwa.** Zauważymy, że przy dłuższym użyciu ogniwa prąd słabnie i wreszcie przestaje

płynąć. Przyczyną tego jest zjawisko zwane **polaryzacją**, a powstające wskutek zmiany chemicznego ustroju ogniwa.

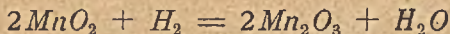
W ogniwie prąd płynie po obwodzie wewnętrznym przez elektrolit od katody do anody. W większości wypadków, wchodzące do elektrolitu jony metalu, z którego sporządzona jest katoda, bądź to wypierają znajdujące się w elektrolicie jony wodoru, bądź też, rozbrajając się na anodzie, działają na elektrolit lub materiał, z którego zrobiona jest anoda. Produkty, powstające z tych reakcji, wydzielają się na elektrodach, tworząc jakby warstwy izolujące, przeszkadzające w działaniu ogniwa.

Polaryzacji zapobiega się w najrozmaitszy sposób, zależnie od rodzaju części składowych ogniwa. W wypadku wydzielania się wodoru, stosujemy środki utleniające, przyczem umieszczamy je przy elektrodzie dodatniej.

**Ogniwo Leclanche'a** składa się z naczynia szklanego *A* (rys. 236) napełnionego roztworem wodnym salmiaku ( $NH_4Cl$ ), w którym, jako w elektrolicie, zanurzone są: cylinder cynkowy *B* z przylutowanym doń paskiem ołowianym *F*, służącym jako zacisk i pałeczka z prasowanego węgla retortowego otoczona masą depolaryzacyjną *D*. Pomiedzy masą *D* i cylindrem cynkowym *B* znajdują się kółka izolujące *g*. Węgiel jest elektrodą dodatnią, cynk ujemną. Procesy chemiczne zachodzące w ogniwie są następujące:



przyczem amoniak ( $NH_3$ ) ulatnia się, wodór ( $H_2$ ) wydziela się na anodzie i zostaje pochłonięty w myśl reakcji:



przez depolaryzator składający się w 90% z dwutlenku

manganu (brausztynu) i 10% miazu grafitowego. Już po krótkim jednak działaniu ogniwo wskutek wolnego pochłaniania wodoru przez brausztyn polaryzuje się i prąd musi być przerwany. Ogniwo to więc nadaje się głównie do prądów krótkotrwałych, gdy po krótkim działaniu następuje przerwa, czyli t. zw. odpoczynek ogniwa. Siła elektromotoryczna ogniwa Leclanche'a wynosi 1,5 volta. Średnia oporność wewnętrzna około 0,5 oma.

Zalety ogniwa są następujące:

- 1) przy obwodzie otwartym nie zachodzi proces chemiczny,
- 2) znaczna siła elektromotoryczna,
- 3) mała oporność wewnętrzna,
- 4) nieznaczne koszty,
- 5) zdolność do pracy przy względnie niskich temperaturach.

Stroną ujemną ogniwa jest:

- 1) szybka polaryzacja ogniwa,
- 2) osiadanie chlorku cynku na katodzie, co zmusza do mechanicznego jej oczyszczania, mogącego spowodować uszkodzenie ogniwa.

**Ogniwo suche.** Oprócz wyżej opisanego ogniwa mokrego Leclanche'a, w praktyce używamy bardzo często ogniwa suche. Ogniwa te różnią się od mokrych tem, że jako elektrolit służy w nich nawpół stężona mieszanina żelatyny z salmiakiem, lub nasycone tym ostatnim porowate ciała np. papier, trociny i t. d. Żeby uchronić ogniwo od szybkiego wysychania zalewa go się mieszaniną żywicy ze smołą. Takie ogniwo wyładowywane bez przerwy przez obwód zewnętrzny o oporności 10 omów może działać około 330 godzin.

**Ogniwo sucho-mokre.** Odmianą suchego ogniwa jest typ ogniwa sucho-mokrego (rys. 237), zawiera ono salmiak w postaci suchego proszku częściowo wchodzącego w skład masy depolaryzującej *D*, częściowo w skład masy porowatej *E*. Ogniwo takie w miejscach suchych można przechowywać latami. Przed użyciem nalewa się do ogniwa czystą wodę przez otwór *A*, otwór *B* służy do wydzielania powietrza podczas nalewania wody i amoniaku podczas działania ogniwa. Dzięki łatwości w przenoszeniu, ogniwa te są używane do telegrafów i telefonów polowych. Wyładowywane w sposób jak podano wyżej mogą działać około 270 godzin.

**Ogniwo Meidíngera** (rys. 238) składa się z szklanego słoja *A* zwężonego w części dolnej, cynkowego walca *D* opartego na wrębie i miedzianego *E*, umieszczonego w oddzielnem naczyniu szklanem na dnie słoja. Całość ogniwa przykryta jest szklanym balonem *C*, napełnionym krzysztalkami siarczanu miedzi ( $CuSO_4$ ). Druty miedziane przylutowane do walców *D* i *E* służą jako końcówki ogniwa, przytem drut *F* jest w izolacji celem zabezpieczenia go przed zetknięciem się z cynkiem. Cynk zanurzony jest w zwykłej wodzie, zawierającej niewielką ilość jakiejś soli obojętnej, zazwyczaj soli gorzkiej  $MgSO_4$  miedź — w siarczanie miedzi.

Działanie chemiczne ogniwa polega z początku na wytwarzaniu się niewielkiej ilości wodoru, jako produktu rozkładu wody. Wodór osiada na miedzianej elektrodzie ogniwa i działając na siarczan miedzi w myśl reakcji:



wytwarza chemicznie czystą miedź i kwas siarkowy ( $H_2SO_4$ ). Ten ostatni, jako lżejszy od roztworu kwaś-



nego koperwasu miedzi, wypływa do góry i działa na cynk, wytwarzając wodór i siarczan cynku:



Jak widzimy z procesu chemicznego, elektrolitem ogniwa jest kwas siarkowy, depolaryzatorem — roztwór siarczanu miedzi, elektrodami: dodatnią — miedź, ujemną — cynk. Dzięki szybkiemu działaniu  $\text{CuSO}_4$  na wodór ogniwo Meidingera nie polaryzuje się wcale i daje jednostajny najwięcej zbliżony do stałego prąd elektryczny. Z biegiem czasu elektroda cynkowa zupełnie rozpuszcza się w kwasie siarkowym, natomiast miedź narasta kryształami czystej elektrolitycznej miedzi.

Zmieszanie roztworów zawartych w ogniwie robi je niezdatnem przez pewien czas do użytku.

Siła elektromotoryczna tego ogniwa wynosi około 1 volta, oporność wewnętrzna, zależnie od wymiarów elektrod i odległości między nimi, waha się między 3 — 4-oma omami. Ogniwo to ma duże zastosowanie w telegrafji oraz wszelkiego rodzaju sygnalizacji.

Jako zaletę ogniwa można przytoczyć brak polaryzacji i zbyteczność mechanicznego oczyszczania cynku; jako wady: dużą oporność wewnętrzną, a więc małe natężenie prądu ogniwa, konieczną ostrożność przy przenoszeniu ogniwa, oraz nienatychmiastowe działanie nowozestawionego, opóźniane powolnem wytwarzaniem kwasu siarkowego i rozpuszczeniem się kryształów siarczanu miedzi.

Ogniwo Wetsona (rys. 239) składa się z 2-ch próbówek połączonych rurką poprzeczną. W dna próbówek wtopione są rurki z drucikami platynowemi amalgamowanemi, około 0,4 mm. grubości. W jednej z próbówek znajduje się amalgamat kadmu (6 części

rtęci na jedną część kadmu), który pokrywa całkowicie wystający koniec drucika platynowego, nasypane na wierzchu kryształki siarczanu kadmu. Do drugiej próbówki nalewa się rtęć, tak, aby zakryła wystający drucik platynowy, a następnie zasypuje się mieszaniną drobno sproszkowanego siarczanu rtęciowego, kryształów siarczanu kadmu, rtęci i stężonego roztworu siarczanu kadmu. Na warstwy te zostaje nalany stężony roztwór siarczanu kadmu i próbówki zalutowane. Biegun dodatni stanowi rtęć, ujemny — amalgamat kadmu. Tak sporządzone ogniwo stanowi wzorzec siły elektromotorycznej. Wielkość tej siły w ogniwie Westona wynosi przy  $20^{\circ}\text{C}$ :  $E = 1,0186$  volta.

**Ogniwo termoelektryczne.** O ile miejsce zetknięcia 2-ch przewodników pierwszej klasy  $A$  i  $B$  będziemy ogrzewali to na galwanoskopie  $G$  połączonym z końcami  $D_1$  i  $D_2$  tych przewodników nastąpi odchylenie wskazówki, wskazujące na istnienie prądu (rys. 240). Poprzednio doszliśmy już do wniosku, że w normalnych warunkach przez zetknięcie przewodników pierwszej klasy prądu stałego otrzymać nie można. Prąd więc tutaj powstały musi być rezultatem zmian, jakie zaszły w układzie, a więc w tym wypadku podniesienia temperatury w miejscu zetknięcia  $C$  przewodników. Taki prąd, powstały dzięki przekształceniu energii cieplnej na energię elektryczną, nazywamy prądem **termoelektrycznym**. Układ, służący do otrzymywania takiego prądu, zowie się ogniwem termoelektrycznym.

Początkowo Seebeck a potem Becquerel, badali zjawisko powstawania prądu termoelektrycznego i ułożyli z przewodników pierwszej klasy następujący szereg termoelektryczny:

Bismut (*Bi*), nikiel (*Ni*), platyna (*Pt*), złoto (*Au*), miedź (*Cu*), cyna (*Sn*), ołów (*Pb*), cynk (*Zn*), srebro (*Ag*), żelazo (*Fe*), antymon (*Sb*).

W ogniwie termoelektrycznym, przy ogrzewaniu miejsca złączenia przewodników, prąd będzie płynął od przewodnika znajdującego się w szeregu bliżej początku np. jeżeli weźmiemy (rys. 240) przewodnik *A* z platyny, *B* — z żelaza, to otrzymamy kierunek prądu termoelektryczny taki, jak pokazano na rysunku.

Siła elektromotoryczna wywołująca prąd termoelektryczny w obwodzie zależy od różnicy temperatur między końcami stykających się ze sobą przewodników i jest wogóle bardzo niewielka. W powyższym przykładzie, jeżeli temperatura w punkcie *C* będzie  $100^{\circ}\text{C}$ , na końcach *D*<sub>1</sub> i *D*<sub>2</sub>  $0^{\circ}\text{C}$ , to wielkość siły elektromotorycznej powstałej dzięki tej różnicy temperatur będzie się równała 1,45 milivoltów. O ile w tych warunkach weźmiemy zamiast żelaza cynk, to siła elektromotoryczna, zachowując ten sam kierunek będzie wynosiła 0,75 milivolta.

Przy małych temperaturach pomiędzy wielkością powstającej siły elektromotorycznej i różnicą temperatur zachodzi proporcjonalność, natomiast przy wysokich temperaturach proporcjonalności tej niema.

Ze względu na to, że natężenie prądu otrzymanego w ogniwie termoelektrycznym jest zbyt małe nie używa się tego ostatniego, jako źródła energii elektrycznej, natomiast ogniwo to ma duże zastosowanie do budowy termometrów, służących do mierzenia bardzo wysokich temperatur. Zazwyczaj w termometrach takich używamy nie jednej pary, a kilku par tych samych przewodników, połączonych szeregowo (rys. 241). Wszystkie połączenia oznaczone liczbami *n* parzystymi mają jednakową temperaturę  $t_1$ , parzystymi —  $t_2$ , odmienną

od temperatury  $t_1$ . Takie połączenie par przewodnikiem pierwszej klasy nazywamy stosem termoelektrycznym.

Ogniwo, wytwarzające prąd elektryczny, możemy porównać z instalacją składającą się z 2-ch zbiorników z wodą  $A$  i  $B$ , pompy  $E$  i włączonej w obwód turbiny (rys. 242).

### Tabela porównawcza.

- |   |  |
|---|--|
| 1) Prąd wodny sływa korytkiem $D$ z górnego zbiornika $A$ na koło turbiny $C$ i odpływa korytkiem $F$ do dolnego zbiornika $B$ ;                                      | 1) Obwód zewnętrzny prądu ogniwa: przewodnik $D$ łączący biegun dodatni z żarówką elektryczną $C$ i przewodnik $F$ , łączący żarówkę elektryczną z biegunem ujemnym; |
| 2) prąd wodny z dolnego zbiornika $B$ przechodzi przez pompę $E$ do górnego zbiornika $A$ ;   | 2) obwód wewnętrzny ogniwa: elektroda ujemna $B$ , elektrolit i elektroda dodatnia $A$ ;   |
| 3) podtrzymywanie stałej różnicy poziomów wody w zbiornikach $A$ i $B$ zapomocą pompy $E$ ;   | 3) podtrzymywanie stałej różnicy potencjałów na biegunach ogniwa $A$ i $B$ przez siłę elektromotoryczną ogniwa $E$ ;   |
| 4) energia mechaniczna maszyny parowej lub elektromotoru $P$ , poruszającego pompę wodną $E$ ;  | 4) energia chemiczna ogniwa wytwarzająca siłę elektromotoryczną ogniwa $E$ ;   |
| 5) zmniejszenie wydajności pompy wskutek zużycia częściowego energii na pokonanie tarcia wody o ścianę rurociągów łączących dolny zbiornik z górnym i wewnątrz pompy; | 5) zmniejszenie użytecznej wielkości wytworzonej w ogniwie siły elektromotorycznej wskutek oporu wewnętrznego ogniwa;  |
| 6) zużyta na tarcie i uderzenia energia strumienia wodnego  | 6) zużyta energia prądu elektrycznego na pokonanie opor-   |

spływającego z górnego zbiornika *A* przez koło turbiny *C* do zbiornika *B*;      ności obwodu zewnętrznego ogniwa;

- 7) energia kinetyczna obracającego się wirnika turbiny.      7) energia cieplna i świetlna żarzącego się drucika żarówki *C*.

**Łączenie ogniów w baterji.** Ogniwo galwaniczne, w zależności od swych własności elektromotorycznych i oporu wewnętrznego, może wytwarzać prąd o mniejszym lub większym, ale w praktyce, o nieznacznym natężeniu. Tymczasem potrzebujemy często źródła, które byłoby zdolne dostarczać prądu o stosunkowo dużym natężeniu, niezbędnym dla uruchamiania elektrycznych aparatów i przyrządów. Aby cel ten osiągnąć łączymy pojedyncze ogniwa w baterje. Zależnie od wielkości oporności obwodu zewnętrznego i wewnętrznego poszczególnych ogniów, z których chcemy ułożyć baterję, łączymy ogniwa szeregowo, równolegle i mieszanie.

**Łączenie szeregowe** (rys. 243) polega na łączeniu katody pierwszego ogniwa z anodą następnego ogniwa i t. d., wówczas zaciski anody pierwszego i katody ostatniego ogniwa są zaciskami baterji i do nich załączamy obwód zewnętrzny. Tak łączone ogniwa mogą być o różnych siłach elektromotorycznych i o różnych opornościach wewnętrznych. Przy połączeniu szeregowem siły elektromotoryczne pojedynczych ogniów współdziałają i cała baterja przedstawia jakby jedno ogniwo o sile elektromotorycznej równej sumie tychże poszczególnych ogniów.

Jeżeli będziemy mieli w baterji szeregowo połączonych  $n$  różnych ogniów o siłach elektromotorycznych  $e_1, e_2, e_3, \dots$ , oraz o opornościach wewnętrznych

$r_1, r_2, r_3$ , i t. d., a oporności obwodu zewnętrznego wynosić będzie  $R$ , to na mocy prawa Ohma możemy napisać:

$$J = \frac{E}{R_s + R_w} = \frac{e_1 + e_2 + e_3 + \dots}{r_1 + r_2 + r_3 + \dots R_s}$$

gdzie  $E$  siła elektromotoryczna  $R_s$  i  $R_w$  oporności zewnętrzna i wewnętrzna baterji.

W wypadku, gdy ogniwa są o jednakowych siłach elektromotorycznych i opornościach wewnętrznych, to:

$$J = \frac{en}{rn + R} = \frac{e}{r + \frac{R}{n}}$$

Widzimy więc, że zwiększając w takiej baterji liczbę ogniw otrzymujemy rezultat taki, jak gdybyśmy zmniejszyli przy jednym ogniwie oporność obwodu zewnętrznego. Dlatego też połączenia szeregowego używamy, kiedy oporność obwodu zewnętrznego jest bardzo duża w porównaniu z opornością wewnętrzną poszczególnych ogniw, np. przy 5-ciu ogniwach Leclanche'a, z których każde ma siłę elektromotoryczną  $E = 1,5$  volt, oporność wewnętrzną  $= 0,3$  oma, przy oporności zewnętrznej  $R = 10$  omów, po połączeniu szeregowem otrzymamy natężenie prądu w obwodzie:

$$J = \frac{1,5}{0,3 + \frac{10}{5}} = 0,65 \text{ amp.}$$

Używane w radjotelegrafji baterje anodowe, składają się z suchych ogniw Leclanche'a połączonych szeregowo. Baterje te są umieszczone w hermetycznych skrzynkach, zaopatrzonych nazewnątrz w gniazdka.

Chcąc unormować napięcie baterji łączymy zawsze jeden koniec obwodu zewnętrznego z gniazdkiem oznaczonym przez 0, drugi z gniazdkiem, zależnie od potrzeby, oznaczonym 10, 20, 40, 60, 80 i 100 volt.

Szeregowe łączenie ogniów w baterję możemy porównać z instalacją hydrauliczną, podaną na rys. 244.

### Tabela porównawcza.

- |  |   |
|--|---|
| 1) Zbiorniki z wodą ustawione jeden na drugim i połączone pomiędzy sobą pompami, tłoczającymi wodę z równą siłą; | 2) ogniwa o równych siłach elektromotorycznych, łączące się ze sobą różnoimiennymi biegunami;   |
| 2) różnica poziomów wody w 2-ech kolejnych zbiornikach, ustawionych jeden nad drugim: $h_1, h_2, h_3$ ;          | 2) różnica potencjałów na zaciskach poszczególnych ogniów $v_1, v_2, v_3$ ;   |
| 3) różnica poziomów wody $H$ w zbiorniku najniższym i najwyższym;  | 3) różnica potencjałów na zaciskach baterji;  |
| 4) pompy tłoczące podtrzymujące stałe różnice poziomów w następujących po sobie zbiornikach;                     | 4) siły elektromotoryczne poszczególnych ogniów;  |
| 5) obwód wodny, składający się z zbiorników oraz pomp;   | 5) obwód wewn. baterji, składający się z obwodów wewn. poszczególnych ogniów;   |
| 6) obwód wodny składający się z rur łączących zbiornik górny i dolny wraz z włączoną w obwód turbiną.            | 6) obwód zewn. baterji składający się z przewodników łączących bieguny baterji z włączonym w obwód odbiornikiem (żarówka, maszyny elektryczne). |

**Łączenie równoległe** (rys. 245) ogniów polega na połączeniu oddzielnie wszystkich biegunów dodatnich i ujemnych. Wówczas wspólny zacisk biegunów dodatnich oraz wspólny zacisk biegunów ujemnych będą zaciskami baterji i do nich załączamy obwód zewnętrzny. Tak połączone ogniwa muszą być o jednakowej sile elektromotorycznej i oporach wewnętrznych.

Jeżeli połączymy równolegle  $n$  ogniw o jednakowych siłach elektromotorycznych  $e$  i jednakowych opornościach wewnętrznych  $r$ , to w obwodzie wewnętrznym baterji będziemy mieli tyle rozgałęzień, wiele ogniw łączymy równolegle. Na mocy poprzednio wyprowadzonych wzorów na łączenie oporów możemy napisać:

$$\frac{1}{R_w} = \frac{1}{r} + \frac{1}{r} + \frac{1}{r} + \dots$$

$$\frac{1}{R_w} = \frac{n}{r}; R_w = \frac{r}{n}$$

gdzie  $R_w$  wypadkowa oporność wewnętrzna baterji.

Ze względu na to, że bieguny poszczególnego ogniwa są jednocześnie biegunami baterji, więc

$$E = e$$

gdzie  $E$  i  $e$  siły elektromotoryczne baterji i ogniw.

Na zasadzie prawa Ohma mamy:

$$J = \frac{E}{R_w + R_s} = \frac{e}{\frac{r}{n} + R_s}$$

Zwiększając więc w baterji liczbę ogniw łączonych równolegle, temsamem będziemy zmniejszali oporność wewnętrzną baterji. Dlatego też połączenie równoległe używamy w wypadkach, gdy oporność zewnętrzna obwodu jest mała w porównaniu z opornością wewnętrzną poszczególnego ogniwa, np. przy 5-ciu połączonych równolegle ogniwach Meidingera, z których każde ma siłę elektromotoryczną  $e = 1$  volt, oporność wewnętrzną  $r = 5 \Omega$ , przy oporności zewnętrznej  $R = 1 \Omega$ , otrzymamy natężenie prądu:

$$J = \frac{1}{1 + 1} = 0,5 \text{ amp.}$$



Przy szeregowym połączeniu tychże ogniw, natężenie prądu będzie wynosiło:

$$J = \frac{1}{5 + \frac{1}{5}} = 0,19 \text{ amp.}$$

Widzimy więc że ta sama ilość jednakowych ogniw połączonych równolegle w baterję daje prąd o natężeniu przeszło 2,5 razy większem, aniżeli przy połączeniu szeregowem.

**Łączenie mieszane** stosujemy, gdy chodzi nam o równoczesne uzyskanie korzyści połączenia szeregowego i równoległego, a więc o uzyskanie stosunkowo dużego napięcia na zaciskach baterji i zmniejszenie oporności wewnętrznej baterji.

Łączenie mieszane polega na połączeniu szeregowo po kilka ogniw w grupy, które to grupy łączymy pomiędzy sobą równolegle (rys. 246). Do takiej baterji możemy użyć ogniw o różnych napięciach i różnych opornościach wewnętrznych, dbając jednakże o to, żeby napięcie na zaciskach każdej grupy było jednakowe.

Jeżeli mamy połączonych równolegle  $M$  grup, składających się każda z  $N$  ogniw połączonych szeregowo, i gdy przytem siły elektromotoryczne i oporności wewnętrzne wszystkich ogniw są jednakowe i równe odpowiednio  $e$  i  $r$ , to na podstawie omawianego już poprzednio łączenia ogniw szeregowo i równolegle możemy powiedzieć:

- 1) napięcie na zaciskach każdej grupy będzie:

$$E = Ne$$

- 2) oporność wewnętrzna każdej grupy będzie:

$$R = Nr$$

- 3) napięcie na zaciskach całej baterji, będzie takie same, jak każdej poszczególnej grupy:

$$E = Ne$$

4) oporność wewnętrzna całej baterji będzie  $M$  razy mniejsza, niż oporność wewnętrzna każdej grupy, t. j.

$$R_w = \frac{Nr}{M};$$

Jeżeli zaciski baterji połączymy przewodnikiem o oporze  $R_z$ , wówczas w obwodzie popłynie prąd o natężeniu:

$$J = \frac{E}{R_z + R_w} = \frac{eN}{\frac{Nr}{M} + R_z} = \frac{e}{\frac{r}{M} + \frac{R_z}{N}}$$

Odpowiednio do posiadanej ilości ogniw możemy  $M$  i  $N$  tak dobrać, żeby otrzymać jaknajwiększe natężenie prądu. Takie najdogodniejsze połączenie ogniw w baterję, otrzymamy gdy oporność zewnętrzna całej baterji będzie równa oporności wewnętrznej, np. jeżeli mamy 28 ogniw, z których każde posiada siłę elektromotoryczną 1,5 volta i oporność wewnętrzną 2 omy, to przy oporności zewnętrznej 3,5 oma, najdogodniejsze łączenie mieszane ogniw, czyli największe natężenie prądu w obwodzie otrzymujemy z następującego obliczenia:

1) oporność zewnętrzna winna być równa wewnętrznej:

$$\frac{Nr}{M} = \frac{N \cdot 2}{M} = 3,5$$

2) całkowita ilość ogniw baterji równa się iloczynowi ogniw grupy przez ilość grup:

$$NM = 28; N = \frac{28}{M}$$

3) ilość grup połączonych równolegle w baterji:

$$\frac{28 \cdot 2}{M^2} = 3,5; M^2 = 16; M = 4.$$

4) ilość ogniw łączonych szeregowo w każdej grupie:

$$N = \frac{28}{4} = 7$$

5) natężenie prądu w obwodzie zewnętrznym przy najdogodniejszym połączeniu:

$$J = \frac{eN}{\frac{Nr}{M} + R_z} = \frac{1,5 \cdot 7}{\frac{7 \cdot 2}{4} + 3,5} = 1,5 \text{ amp.}$$

**Sprawność ogniwa.** W każdym ogniwie część jego siły elektromotorycznej zużywa się na pokonanie oporności wewnętrznej. Jeżeli siła elektromotoryczna jest  $E$ , to na zaciskach tego ogniwa otrzymamy napięcie  $V < E$ , przyczem:

$$E = V \left( 1 + \frac{R_w}{R_z} \right)$$

Sprawnością ogniwa nazywamy stosunek mocy elektrycznej użytecznej, t. j. tej jaką ogniwo wydaje nazewnątrz  $VJ$  do mocy elektrycznej wytwarzanej z energii chemicznej wewnątrz ogniwa  $EJ$ .

Jasnym więc jest, że sprawność ogniwa będzie zawsze mniejsza od 1. Oznaczając sprawność ogniwa przez  $\eta$  mamy:

$$\eta = \frac{VJ}{EJ} = \frac{V}{E} = \frac{R_z}{R_z + R_w}$$

Maksimum mocy otrzymamy przy połączeniu ogniw tak, aby  $R_z = R_w$ ; ostatnie równanie przyjmie wtedy postać:

$$\eta = \frac{R_z}{R_z + R_w} = 0,5$$

Widzimy więc, że w tym wypadku sprawność ogniwa wynosi  $\eta = 0,5$ .

Otrzymamy jednakże o wiele większą sprawność, gdy nie wykorzystamy całkowicie mocy ogniwa, co wynika ze wzoru:

$$\eta = \frac{R_s}{R_s + R_w} = \frac{1}{1 + \frac{R_w}{R_s}}$$

przy zwiększaniu  $R_s$   $\eta$  można dojść nawet do 85%.

### Z a d a n i a:

1. Ogniwa Leclanche'a i Meidingera są połączone przewodem o oporności  $0,6 \Omega$  i działają jedno przeciw drugiemu (rys. 247). Określić różnicę potencjałów na zaciskach każdego ogniwa, jeżeli ogniwo Leclanche posiada:  $E_L = 1,5$  volt,  $R_L = 0,5$  oma, ogniwo Meidingera posiada:  $E_M = 1$  volt,  $R_M = 5$  omów. Natężenie prądu w obwodzie:

$$J = \frac{E}{R} = \frac{1,5 - 1}{0,5 + 0,6 + 5} = 0,082 \text{ amp.}$$

Różnica potencjałów  $V_L$  ogniwa Leclanche, ze względu na to, że prąd przechodzi przez niego w kierunku siły elektrodźwicznej  $E_L$  będzie:

$$V_L = E_L - JR_L = 1,5 - 0,082 \cdot 0,5 = 1,459 \text{ volt.}$$

Różnica potencjałów  $V_M$  na zaciskach ogniwa Meidingera, ze względu na to, że prąd przechodzi przez niego w kierunku przeciwnym jego sile elektrodźwicznej  $E_M$ , będzie:

$$V_M = E_M + JR_M = 1 + 0,082 \cdot 5 = 1,41 \text{ volt.}$$

2. Bateria o sile elektromotorycznej 35 volt (rys. 248) jest połączona 1-no przewodową linią miedzianą o przekroju  $5 \text{ mm.}^2$  z aparatem Juza, o oporności

wewnętrznej  $1200 \Omega$ , potrzebującym do swej pracy  $22 \text{ mA}$ . W jakiej odległości aparatu od baterji można utrzymać korespondencję, jeżeli oporność wewnętrzna baterji wynosi  $175 \Omega$ , a oporność uziemień  $15 \Omega$ .

Siła elektromotoryczna musi pokonać wszystkie opory, obwodu i utrzymać prąd o natężeniu  $22 \text{ mA}$ :

$$35 = 0,022 \left[ 1200 + 175 + 15 + \rho \frac{l}{5} \right]$$

$$l = \frac{35 \cdot 1000 - 22 \cdot 1390}{22} \cdot \frac{5 \cdot 1000}{175} = 57,4 \text{ klm.}$$

3. Na końcach żelaznej linii telegraficznej o przekroju  $6 \text{ mm}^2$  i długości  $60 \text{ km}$ . istnieje spadek napięcia  $10 \text{ volt}$ . Jakie jest natężenie prądu w tej linii:

Oporność linii telegraficznej:

$$R_l = \rho \cdot \frac{l}{s} = 0,1 \cdot \frac{60000}{6} = 1000 \Omega.$$

Natężenie prądu obliczymy ze wzoru:

$$V_l = J R_l; 10 = J \cdot 1000; J = \frac{10}{1000} = 0,01 \text{ amp.}$$

4. W obwodzie zewnętrznym źródła prądu o napięciu  $140 \text{ voltów}$  (rys. 249) włączamy: a) opornik lampowy  $A$  składający się z 2-ch przewodników o znikomo małej oporności i równolegle włączonych pomiędzy nimi żarówek, każda o oporności wewnętrznej  $240 \text{ omów}$ , b) ogniwo wtórne (baterja akumulatorów)  $B$  o napięciu na swych zaciskach  $20 \text{ volt}$ . Źródło prądu i ogniwo wtórne działają jedno przeciw drugiemu. Obliczyć, jakie natężenie prądu będzie w obwodzie przy włączeniu do opornika jednej lampy

i 5-ciu lamp, jeżeli pominiemy oporność łączących przewodów i oporność wewnętrzną ogniwa wtórnego oraz źródła prądu.

Przy włączeniu jednej lampy do opornika natężenie prądu w obwodzie:

$$J_1 = \frac{140 - 20}{240} = 0,5 \text{ amp.}$$

przy włączeniu 5-ciu lamp do opornika, zmniejszymy wypadkową oporność opornika 5 razy, wobec tego natężenie prądu w obwodzie:

$$J_2 = \frac{140 - 20}{\frac{240}{5}} = 2,5 \text{ amp.}$$

Z tego widzimy, że zapomocą równoległego włączania w oporniku lampowym odpowiedniej ilości lamp, możemy, znając napięcie źródła prądu, regulować natężenie prądu przechodzącego przez ogniwo wtórne (natężenie prądu ładującego baterję akumulatorów).

## Akumulatory.

Elementy wtórne, do których należą akumulatory, mogą być źródłem prądu jedynie po uprzednim podaniu działaniu prądu elektrycznego czyli po naładowaniu.

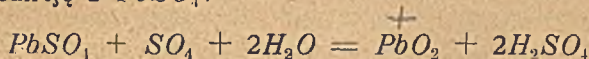
W czasie ładowania energia elektryczna przechodzi w energję chemiczną, a ta ostatnia, w czasie rozładowania, przechodzi zpowrotem w energję elektryczną.

Najbardziej rozpowszechnione są akumulatory ołowiane. Płytki ołowiane zanurzone do kwasu siarkowego ( $H_2SO_4$ ), pokrywają się warstwą siarczanu ołowiu ( $PbSO_4$ ). Przy przepuszczaniu przez akumulator prądu elektrycznego z zewnętrznego źródła, jony wo-

doru dążą do katody i redukują siarczan ołowiu, którym jest ona pokryta w myśl reakcji:

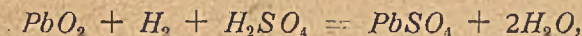


jony  $SO_4$  dążą do anody i po rozbrojeniu się wchodzą w reakcję z  $PbSO_4$ :

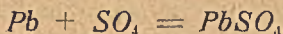


tak, że anoda pokrywa się dwutlenkiem ołowiu.

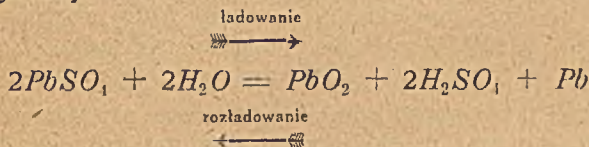
O ile bieguny tak przygotowanego elementu połączymy z jakimś odbiornikiem, to powstanie prąd elektryczny o kierunku przeciwnym prądowi ładowania. W stosunku do zewnętrznego obwodu elektroda pokryta dwutlenkiem ołowiu będzie dodatnim biegunem, elektroda z czystego ołowiu — ujemnym. W czasie rozładowania jony wodoru, znajdujące się w roztworze, dążą do dodatniej elektrody i redukują  $PbO_2$  w myśl reakcji:



a ujemne jony  $SO_4$  dążą do elektrody ujemnej i oddziałują na ołów w myśl reakcji:



łącząc obydwie równania ładowania i rozładowywania otrzymamy:



ładowanie



rozładowanie



Jak widać z ostatniego równania, gęstość roztworu kwasu siarkowego w akumulatorze naładowanym jest większą niż w rozładowanym. Ilość elektryczności,

która może być otrzymana za pośrednictwem akumulatora zależy od masy biorącej udział w reakcji chemicznej.

Pierwsze akumulatory były wykonane sposobem Planté, a mianowicie płytki ołowiane, zanurzone do kwasu siarkowego, poddawane były kolejno ładowaniu i rozładowywaniu w przeciągu dłuższego czasu (około 1 roku), wskutek czego ołów stawał się porowaty i warstwa ołowiu biorąca udział w reakcjach zwiększała się, przez co zwiększała się pojemność akumulatora. Takie formowanie płyt, jako bardzo kosztowne, zostało zastąpione przez sposób Faure'a, polegający na tym, że do akumulatorów stosowane były nie masywne płytki ołowiane, lecz ołowiane szkielety pokryte minją ( $Pb_3O_4$ ). Po pierwszym naładowaniu akumulatora minja na jednej elektrodzie przechodziła w  $PbO_2$ , na drugiej — w czysty ołów.

Obecnie płytki akumulatorów przygotowują się w ten sposób, że szkielet, wykonany z czystego ołowiu z dodatkiem minji (4 — 10%), pokrywa się ciastowatą masą, składającą się z minji ( $Pb_3O_4$ ), tlenku ołowiu ( $PbO$ ) i ołowianych opilek (rys. 250).

Przez Tudor'a został wprowadzony sposób formowania płyt, mający cechy wspólne tak ze sposobem Planté jak i Faure'a. Polega on na tem, że początkowo płytki z głębokimi bruzdami (rys. 251) poddaje się kolejno ładowaniu i rozładowywaniu, aż do osiągnięcia na ich powierzchni warstwy  $PbO_2$  o grubości 0,33 mm, a następnie bruzdy wypełnia się masą  $Pb_3O_4$ , która przy następnem ładowaniu przechodzi w  $PbO_2$ .

W taki lub inny sposób przygotowane płytki umieszcza się w naczyniu szklanem lub ebonitowem, rys. 252, a dla większych akumulatorów, drewnianem lub wybitem blachą ołowianą. Płytki dodatnie pokryte  $PbO_2$ † i ujemne, z porowatego ołowiu, umieszczone są na-



przemian jedna za drugą, przyczem płytek ujemnych jest o edną więcej niż dodatnich, a to z tego powodu, że płytki dodatnie pod działaniem jednostronnem szybko się niszczą (rys. 253).

Elektrody dodatnie są izolowane od ujemnych za pomocą szklanych rurek lub t. zw. przepon, składających się dziurkowanych płytek ebonitowych, niekiedy pokrytych jeszcze deseczkami z specjalnie przygotowanego drzewa lub azbestem. Przegrody te, szerokość i wysokość których równa się wymiarom elektrod, zabezpieczają je od zetknięcia ze sobą nawet wtedy, gdy po dłuższem użyciu akumulatora, płyty zaczynają się wykrzywiać.

Ponieważ z biegiem czasu na dnie naczynia tworzy się osad z opadających cząsteczek elektrod, więc celem zabezpieczenia przed zwarciem pomiędzy elektrodami, dolne krawędzie płytek są oddalone od dna naczynia o 15 do 20 mm.

Podobnie jak ogniwa galwaniczne, akumulatory łączymy w baterje: szeregowo, równoległe i mieszanie. Najczęściej jednak w praktyce jest używane łączenie szeregowo (rys. 254).

### Gęstość elektrolitu w akumulatorach ołowianych.

Jak wspomnieliśmy, gęstość elektrolitu po naładowaniu jest większa niż akumulatora rozładowanego. Najlepszą przewodność elektryczną roztwór  $H_2SO_4$  posiada przy ciężarze właściwym 1,25. W praktyce jednak używamy mniej stężonego roztworu, t. j. o mniejszym ciężarze właściwym, a to dla uniknięcia szybkiego zasiarczenia elektrod.

Przed nalaniem do akumulatora roztwór powinien być przygotowany w osobnem naczyniu w stosunku ciężarowym: 25 części chemicznie czystego kwasu siarkowego (zawartość arszeniku nie powinna przekraczać

0,2 mgr. na 1 kg. kwasu siarkowego przy gęstości 66° Baumé), na 70 części wody destylowanej; roztwór będzie posiadał wówczas ciężar właściwy około 1,142 — 1,18 czyli taki jaki posiada elektrolit w akumulatorze wyładowanym do napięcia 1,85 wolta. Roztwór nie powinien zawierać w sobie chloru, działającego niszcząco na płyty akumulatora i dlatego też pod żadnym warunkiem nie można używać do rozcieńczania kwasu siarkowego wody studziennej, która zawiera zawsze większą niż dopuszczalna ilość chloru.

Podczas przygotowywania roztworu należy zachować następujące przepisy:

- a) dolewać kwas siarkowy do wody a nie odwrotnie, gdyż przy dolewaniu wody do kwasu następuje gwałtowny wzrost temperatury dzięki czemu kwas mógłby się wylewać z naczynia,
- b) przed nalaniem do akumulatora należy sprowadzić temperaturę roztworu do temperatury otoczenia. Dla normalnej pracy akumulatora temperatura otaczająca powinna być w granicach od 5°—20°C; najodpowiedniejszą jest temperatura 15°C.

Gęstość elektrolitu w akumulatorze wzrasta stopniowo w miarę jego ładowania i w końcu, kiedy prąd ładujący rozkłada tylko wodę, powodując gwałtowne wydzielanie się pęcherzyków gazu, ciężar właściwy dochodzi do 1,21 — 1,24; wówczas elektrolit ma barwę mleczną. Zasadniczo fabryki akumulatorów podają natężenie prądu ładowania i wyładowywania akumulatorów.

Do mierzenia gęstości elektrolitu, a razem z tem do badania stanu naładowania lub wyładowania akumulatora, używamy przyrządów zwanych areometrami. Według prawa Archimedesesa, siła, z którą ciecz usiłuje podnieść do góry zanurzone w niej ciało, jest równa ciężarowi cieczy wypchniętej przez to ciało. Wobec

tego areometr tem głębiej będzie się zanurzał, im roztwór jest więcej rozcieńczony, t. j. im jego ciężar właściwy będzie mniejszy.

Przedstawiony na rys. 255 areometr Beaumé'go składa się z szklanej rurki w dolnej części nieco rozszerzonej i zaopatrzonej w odpowiedni ciężarek w celu zachowania położenia pionowego. Wewnątrz rurki znajduje się skala, której podziałki odpowiadają niżej podanym wartościom ciężaru właściwego roztworu:

woda destylowana	ciężar właściwy 1 roztwór	odpowiada	0 <sup>o</sup> Beaumé'go
„	„	1,1	13 <sup>o</sup>
„	„	1,142	18 <sup>o</sup>
„	„	1,15	18,8 <sup>o</sup>
„	„	1,18	22 <sup>o</sup>
„	„	1,21	25 <sup>o</sup>
„	„	1,24	28 <sup>o</sup>
„	„	1,30	33 <sup>o</sup>

Areometr więc Beaumé'go zanurzony do elektrolitu naładowanego akumulatora będzie wskazywał 25 — 28<sup>o</sup>, natomiast zanurzony do elektrolitu wyładowanego akumulatora będzie wskazywał 18 — 22<sup>o</sup>.

W akumulatorach stałych areometr Beaumé'go stale jest zanurzony w elektrolicie. W akumulatorach polowych, celem zmierzenia gęstości zapomocą areometru nalewamy elektrolitu do menzurki.

**Oporność wewnętrzna akumulatorów ołowianych** zależy od wielkości powierzchni płyt, odległości pomiędzy płytami dodatnimi i ujemnymi, gęstości i temperatury elektrolitu oraz stanu płyt. Oporność wewnętrzna akumulatora wynosi około 0,08 oma dla 1 dcm.<sup>2</sup> całkowitej powierzchni płyt dodatnich. Dla  $n$  dcm.<sup>2</sup> będzie ona  $n$ -razy mniejsza.

**Gęstość prądu w akumulatorach ołowianych.** Gęstością prądu ładowania lub wyładowania akumulatora nazywamy ilość amperów, przypadających na 1 dcm<sup>2</sup> całkowitej powierzchni płyt dodatnich. Największa dopuszczalna gęstość prądu dla akumulatorów ołowianych stałych wynosi 1,3 ampera na 1 dcm<sup>2</sup>, dla akumulatorów polowych — od 0,5 do 0,9 ampera na 1 dcm<sup>2</sup>.

Jeżeli oznaczymy przez  $S$  powierzchnię płyt dodatnich w dcm<sup>2</sup>, całkowite natężenie prądu, przepływającego przez akumulator przez  $J$ , to gęstość prądu  $j$  w akumulatorze możemy wyrazić zapomocą następującego wzoru:

$$j = \frac{J}{S} \text{ amperów na 1 dcm}^2.$$

Zazwyczaj na akumulatorze podane jest natężenie prądu, którym powinien być on naładowany i wyładowywany.

Ponieważ natężenie prądu naładowania i wyładowania jest zależne od powierzchni elektrod, jest więc zależne również i od ich masy, dlatego też niektórzy konstruktorzy podają natężenie prądu ładowania i wyładowania akumulatora w postaci ilości amperów przypadających na 1 kg. elektrod. Na 1 kg. elektrody dopuszczalne jest natężenie prądu przy ładowaniu od 0,5 do 1,5 ampera, przy wyładowywaniu od 1—2 amperów.

Przy ładowaniu akumulatory są odbiornikami prądu, posiadającymi własną siłę elektromotoryczną, która powinna być zawsze mniejszą od elektromotorycznej siły źródła ładującego. Jeżeli wielkość siły elektromotorycznej źródła ładującego jest  $E$  wolt, wielkość siły elektromotorycznej akumulatorów —  $E'$ , oporność wypadkowa źródła ładującego i przewodów łączących

$R$  omów, to natężenie prądu ładującego  $J$ , wyrażone w amperach będzie:

$$J = \frac{E - E'}{R}$$

Przy wyładowywaniu akumulatory są źródłami prądu. Jeżeli wielkość elektromotorycznej siły akumulatorów jest  $E$  wolt, oporność wewnętrzna —  $R$  omów, oraz oporność obwodu zewnętrznego —  $r$  omów, to natężenie prądu wyładowania  $J$ , wyrażone w amperach będzie:

$$J = \frac{E}{R + r}$$

### Z a d a n i e.

Akumulator ołowiany posiada 5 płyt, każda o szerokości 10 cm. i wysokości 15 cm. O jakim natężeniu prądem możemy ładować akumulator, jeżeli gęstość prądu  $j$  równa się 1 amper na  $\text{dcm}^2$ .

Akumulator posiada 2 płyty dodatnie i 3 płyty ujemne.

Obustronna powierzchnia płyt dodatnich, przez którą prąd wchodzi do akumulatora będzie:

$$S = 2 \cdot 10 \cdot 15 \cdot 2 = 600 \text{ cm}^2. = 6 \text{ dcm}^2.$$

Natężenie prądu ładowania akumulatora (normalne natężenie prądu):

$$J = Sj = 6 \cdot 1 = 6 \text{ amperów}$$

Zwarcie akumulatora powstaje przy bezpośrednim połączeniu jego biegunów lub przy zetknięciu się ze sobą płyt. Dzięki małej oporności wewnętrznej aku-

mulatora, natężenie prądu przy zwarciu będzie od 200 do 2000 amperów. Prąd o tak wysokim natężeniu jest bardzo szkodliwy, gdyż powoduje wykrzywianie się, pękanie i zasiarczanie płyt.

Przyczyny zwarcia akumulatora mogą być następujące:

- a) nieprawidłowe umocowanie płyt, biegunów i prętów, łączących płyty z biegunami,
- b) osad z cząsteczek elektrod zbierający się na dnie naczynia,
- c) w akumulatorach przenośnych połowych, wilgoć i deszcz powodujące połączenie się biegunów przez wodę zakwaszoną (krople deszczu zmieszane z kwasem siarkowym).

### Z a d a n i e.

Akumulator ołowiany o 9 płytach, każda o wymiarze 25 cm. na 40 cm., został zwarty przez połączenie się biegunów. Jaki prąd popłynie przez akumulator przy zwarciu i jaki jest prąd normalny.

Akumulator posiada 4 płyty dodatnie i 5 ujemnych.  
Obustronna powierzchnia płyt dodatnich:

$$S = 2,5 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 4 = 80 \text{ dm}^2.$$

Oporność wewnętrzna akumulatora:

$$r = \frac{0,08}{80} = 0,001 \text{ oma}$$

Natężenie prądu w akumulatorze przy jego zwarciu:

$$J_1 = \frac{2}{0,001} = 2000 \text{ amperów}$$

Normalne natężenie prądu, dopuszczalne dla tego akumulatora, przyjmując gęstość prądu  $j = 1,3$  ampera na  $1 \text{ dcm}^2$  będzie:

$$J = S \cdot j = 1,3 \cdot 80 = 104 \text{ ampery.}$$

Oczywiście prąd przy zwarcu, w porównaniu do prądu normalnego powinien niszcząco podziać na całość płyt akumulatora.

**Pojemnością akumulatora** nazywamy jego zdolność do przemiany pewnej ilości pracy prądu czyli energii elektrycznej w energię chemiczną. Ilościowo pojemność równa się ilości elektryczności zmagazynowanej w naładowanym akumulatorze w postaci energii chemicznej, którą możemy wydobyć przy jego wyładowaniu, nie obniżając przy tem napięcia poniżej 1,85 wolta.

Jakby wynikało z tego określenia musielibyśmy pojemność akumulatora mierzyć w kulombach t. j. amperosekundach, jednak w praktyce mierzymy ją w **amperogodzinach**.

Jeżeli akumulator zasila jakiś odbiornik prądem o natężeniu  $J = 2$  ampery w przeciągu  $t = 6$  godzin, to, o ile jego napięcie nie spadło, poniżej 1,85 wolta, pojemność wyniesie:

$$Jt = 2 \cdot 6 = 12 \text{ amperogodzin.}$$

Dla jednego i tego samego akumulatora otrzymamy różne wartości na pojemność, zależnie od natężenia prądu wyładowania, oraz temperatury, przy której akumulator pracuje. Przy powolnem wyładowaniu t. j. gdy będziemy go wyładowywali małą ilością amperów w przeciągu dłuższego czasu osiągniemy większą pojemność, niż przy wyładowaniu gwałtownem.

Tłumaczy się to tem, że przy słabym prądzie, przemiany chemiczne w akumulatorze zachodzą powoli

i głębiej przenikają do płyt, przez co większa ilość składników czynnych przyjmuje udział w tych przemianach. Jako przykład może służyć wyładowanie akumulatora przy niżej podanych natężeniach prądu:

natężenie prądu	czas wyładowania	pojemność
64 amp.	3 godz.	192 A. G.
44 „	5 „	220 A. G.
32 „	7,5 „	240 A. G.

Dla pomiarów pojemności akumulatora za normalną temperaturę przyjęto temperaturę  $15^{\circ}$  C. Poniżej tej temperatury pojemność akumulatora maleje, powyżej wzrasta do pewnej tylko temperatury krytycznej, która wynosi  $40^{\circ}$  C.

Pozatem pojemność akumulatora zależy od grubości warstwy składników czynnych na płytach, gęstości elektrolitu oraz stanu płyt, zależnego od prawidłowego ich użycia i ilości czasu ich pracy.

Pojemność baterji akumulatorów połączonych szeregowo jest taka sama jak i pojemność pojedynczego akumulatora; połączonych równolegle — jest tyle razy większą od pojemności pojedynczego akumulatora ile jest grup połączonych równolegle.

Podobnie jak natężenie prądu ładowania i wyładowania, oblicza się niekiedy i pojemność, w amperogodzinach przypadających na 1 kg. płyt, przyczem w przybliżeniu wynosi ona około 10—20 A. G. na 1 kg. ciężaru elektrod akumulatora ołowianego.

Dla celów praktycznych natężenie prądu ładowania i wyładowania akumulatora możemy określić, bez obawy uszkodzenia jego elektrod, biorąc 10% jego pojemności, np. jeżeli akumulator jest o pojemności 100 amperogodzin to możemy go ładować i wyładowywać prądem o natężeniu 10 amperów.



## Z a d a n i a.

2 baterje akumulatorów ołowianych, każda o 5 ogniwach i o pojemności 100 A. G. są użyte do zasilania 16-woltowych żarówek 8-wattowych. Jak potrzeba połączyć pomiędzy sobą te baterje i jaki opór trzeba włączyć do obwodu, aby żarówki świeciły norm lnie i ile żarówek można włączyć do obwodu? Jeżeli obie baterje połączymy szeregowo, to otrzymamy napięcie 20 wolt.

Natężenie prądu zasilającego żarówki (przyjmując  $J$  równe 10% pojemności):

$$J = 0,1 \cdot 100 = 10 \text{ amperów.}$$

Opór, który musimy włączyć szeregowo do obwodu:

$$JR = 20 - 16 = 4 \text{ wolty}$$

stąd: 
$$R = \frac{4}{10} = 0,4 \text{ oma.}$$

Natężenie prądu potrzebne dla zasilania jednej żarówki:

$$J_1 = \frac{8}{16} = 0,5 \text{ ampera}$$

ilość żarówek, które możemy włączyć równolegle do obwodu:

$$N = \frac{J}{J_1} = 20 \text{ żarówek}$$

**Energja użyteczna akumulatora** jest to ilość energii elektrycznej, którą dostarcza naładowany akumulator podczas wyładowania, a miarą jej jest praca, którą naładowany akumulator jest w stanie wykonać.

Energja użyteczna akumulatora jest iloczynem z pojemności, wyrażonej w amperogodzinach, przez średnią

wielkość elektromotorycznej siły podczas wyładowania, którą przyjmujemy  $E = 2$  wolty.

Energję użyteczną ( $EJt$ ) mierzymy w jednostkach zwanych wattogodzinami.

### Z a d a n i a.

1. Bateria akumulatorów ołowianych posiada 50 ogniw. Ciężar elektrod każdego ogniwa wynosi 30 kg. Natężenie prądu wyładowania jest 1,5 ampera i pojemność 10 A. G. na 1 kg. ciężaru elektrod akumulatora. Jaka jest energja użyteczna tej baterji akumulatorów, kiedy wszystkie ogniwa są połączone szeregowo oraz kiedy ogniwa są połączone szeregowo w dwóch grupach po 25 ogniw, a same grupy są połączone równolegle (rys. 256)?

Napięcie baterji przy szeregowem połączeniu wszystkich ogniw:

$$E_1 = 2N = 2 \cdot 50 = 100 \text{ volt.}$$

Napięcie baterji przy mieszanem połączeniu ogniw:

$$E_2 = 2 \cdot \frac{N}{2} = 2 \cdot 25 = 50 \text{ volt.}$$

Natężenie prądu wyładowania baterji przy szeregowem połączeniu ogniw:

$$J_1 = 1,5 \cdot 30 = 45 \text{ amperów.}$$

Natężenie prądu wyładowania baterji przy mieszanem połączeniu ogniw:

$$J_2 = 45 \cdot 2 = 90 \text{ amperów.}$$

Pojemność baterji przy szeregowem połączeniu wszystkich ogniw:

$$30 \cdot 10 = 300 \text{ A. G.}$$

Pojemność baterji przy mieszanem połączeniu ogniów:

$$300 \cdot 2 = 600 \text{ A. G.}$$

Energja użyteczna baterji przy szeregowym połączeniu ogniów:

$$E_1 \text{ (A. G.)} = 100 \cdot 300 = 30000 \text{ wattogodzin} = 30 \text{ kwg.}$$

Energja użyteczna baterji przy mieszanem połączeniu ogniów:

$$E_2 \text{ (A. G.)} = 50 \cdot 600 = 30000 \text{ wattg.} = 30 \text{ kwg.}$$

Z tego widzimy, że jeżeli pewną ilość akumulatorów połączymy szeregowo, a następnie równolegle, to przez to zwiększamy pojemność baterji oraz natężenie prądu jej wyładowania, a zmniejszamy napięcie na zaciskach baterji; natomiast energja użyteczna pozostaje w obu wypadkach jednakowa.

2. Silnik elektryczny o mocy 0,1 K. M. i współczynniku sprawności 50% ma być zasilany przez baterję akumulatorów w przeciągu 10 godz. Obliczyć natężenie prądu wyładowania baterji akumulatorów, jeżeli napięcie na zaciskach silnika powinno wynosić 12 wolt. Straty napięcia w przewodach łączących nie przyjmujemy pod uwagę (rys. 257).

Energja użyteczna baterji akumulatorów:

$$0,1 \cdot \frac{735 \cdot 100}{50} \cdot 10 = 1472 \text{ wattgodz.}$$

Pojemność baterji akumulatorów:

$$J t = \frac{E J t}{E} = \frac{1472}{12} = 123 \text{ A. G.}$$

Natężenie prądu wyładowania baterji akumulatorów:

$$J = \frac{J t}{t} = \frac{123}{10} = 12,3 \text{ ampera}$$

**Napięcie na zaciskach akumulatora ołowianego.** Przy ładowaniu akumulatora, ze zwiększeniem gęstości elektrolitu, wzrasta napięcie na jego zaciskach; przy wyładowaniu zaś proces jest odwrotny. Z tego wnioskujemy, że napięcie na zaciskach akumulatora jest zależne od gęstości elektrolitu, natomiast nie zależy od wielkości i ilości płyt.

Napięcie na zaciskach przy ładowaniu akumulatora —  $V_1$  jest większe od jego elektromotorycznej siły  $E$  o wielkości spadku napięcia wewnętrznego  $JR$ :

$$V_1 = E + JR$$

Natomiast przy wyładowaniu napięcie na zaciskach  $V_2$  jest mniejsze od elektromotorycznej siły  $E$  o tę samą wielkość  $JR$ :

$$V_2 = E - JR$$

Przy stałym natężeniu prądu ładowania lub wyładowania wielkości elektromotorycznej siły  $E$  i napięcia na zaciskach akumulatora  $V_1$  i  $V_2$  różnią się pomiędzy sobą o stałą wielkość  $2JR$  (bardzo małą).

Jeżeli przedstawimy w układzie współrzędnych przebieg elektromotorycznej siły (względnie napięcia na zaciskach) przy ładowaniu i wyładowaniu akumulatora, odkładając na osi odciętych wielkości czasu ładowania i wyładowania (przy prądzie stałym będą one proporcjonalne do pojemności  $Jt$ ), na osi rzędnych odpowiednie wielkości elektromotorycznej siły (względnie napięcia na zaciskach), to otrzymamy 2 krzywe przedstawione na rys. 258: ładowania  $AB$  i wyładowania  $BC$ .

Jak widzimy z tych krzywych, na początku ładowania elektromotoryczna siła akumulatora wzrasta bardzo szybko do 2,1 wolta, a następnie wznosi się powoli do wielkości końcowego napięcia ładowania, wynoszącego 2,3 wolta, wówczas to obserwujemy wydzielanie

się gazu z elektrolitu. Przy dalszem ładowaniu napięcie szybko wzrasta i osiąga wartość 2,7 wolta, przy którym następuje gwałtowne wydzielanie się gazu, sprawiające wrażenie gotowania się elektrolitu, przyczem ten ostatni przybiera barwę mleczną. Jest to wskaźnikiem dla zaprzestania dalszego ładowania akumulatora. Przy zaprzestaniu ładowania, dzięki samowyładowaniu akumulatora, napięcie opada bardzo szybko do 2,2 wolta, a przy wyładowaniu obniża się dalej do 2,1 wolta i na tym poziomie pozostaje prawie do końca wyładowania, opadając następnie szybko do 1,85 wolta.

Ilość elektryczności, która przepłynęła przy ładowaniu akumulatora przedstawia graficznie odcinek  $OD$ ; przy wyładowaniu (pojemność akumulatora) — odcinek  $DF$ ; napięcie na początku ładowania (1,85 wolta) — odcinek  $OA$ , w końcu ładowania 2,7 wolta — odcinek  $DB$ , w końcu wyładowania (1,85 wolta) — odcinek  $FC$ ; ilość energii elektrycznej, którą zużyliśmy przy ładowaniu akumulatora — powierzchnia  $OABD$ , przy wyładowaniu (energja użyteczna akumulatora) — powierzchnia  $DBCF$ .

Jeżeli przerwiemy wyładowanie akumulatora, to zauważymy wówczas zjawisko podniesienia się napięcia od 1,85 do 2 wolt, czyli jakby samoładowanie. Jest to rezultatem zrównania się gęstości elektrolitu, który przy wyładowaniu, dzięki przenoszeniu się jonów, posiada gęstość daleko większą bezpośrednio przy elektrodach niż w warstwach położonych dalej. Zjawisko samoładowania najwięcej występuje przy dużem natężeniu prądu wyładowania.

W naładowanym akumulatorze mamy zjawisko **samo-  
wyładowania**. Przyczyną tego jest wilgoć oraz zetknięcie dwóch różnych ciał, wchodzących w skład dodatnich elektrod akumulatora ( $PbO_2$  z  $Pb$ ), kiedy elektrody są przygotowane sposobem Fauré'a i Tudora.

Stopień samowyładowania zależy od:

- a) wielkości powierzchni styku masy czynnej ( $Pb O_2$ ) z ołowianami ramkami ( $Pb$ ) elektrod,
- b) stanu izolacji pomiędzy elektrodami,
- c) zanieczyszczenia elektrolitu.

Wobec tego zjawisko samowyładowania się w akumulatorach, w których płyty są wyrabiane według sposobu Tudora (duża powierzchnia styku  $Pb O_2$  z  $Pb$ ) będzie większe, niż w akumulatorach z płytami wyrobionymi według sposobu Fauré'a; z tego wynika, że akumulator naładowany, musi być co pewien czas ponownie ładowany, chociażby zupełnie nie był używany, aby niedopuścić przez samowyładowanie się do zupełnego wyładowania i zasiarczenia płyt.

Praktyka wykazała, że akumulatory z płytami Tudora powinny być w czasie swego bezczynu ładowane co 1 miesiąc, akumulatory z płytami Fauré'a co 4 miesiące.

Wobec tego, że przy wyładowaniu akumulatorów następuje spadek napięcia na ich zaciskach, więc przy zastosowaniu baterji do zasilania odbiorników, wymagających stałego napięcia, zachodzi potrzeba, w miarę wyładowywania się, włączanie nowych akumulatorów do obwodu. Uskuteczniamy to zapomocą przełącznika  $M$  (rys. 259). Na początku wyładowania przełącznik ten znajduje się na kontakcie  $a$ , wówczas obwód zasilany jest tylko przez część baterji  $AB$ ; następnie, w miarę wyładowania, przesuwamy go stopniowo do kontaktu  $b$ , włączając w ten sposób coraz większą ilość akumulatorów. Gdy przełącznik  $M$  znajduje się na kontakcie  $b$ , wówczas do obwodu są włączone wszystkie akumulatory baterji.

### Z a d a n i e.

Z ilu ogniw powinna się składać baterja akumulatorów o pojemności 1060 A. G. na początku i w końcu jej

wyładowania, jeżeli ma ona zasilać żyrandol, złożony z 105-woltowych żarówek, przy oporności przewodów od baterji do żyrandola, równej 0,03 oma.

Natężenie prądu wyładowania baterji zasilającej żyrandol:

$$J = 0,1 \cdot 1060 = 106 \text{ amperów}$$

Spadek napięcia w przewodach łączących baterję z żyrandolem:

$$J \cdot R = 106 \cdot 0,03 = 3,18 \text{ woltów.}$$

Napięcie na zaciskach baterji zasilającej żyrandol:

$$V = 105 + 3,18 = 108,18 \text{ wolt.}$$

Na początku wyładowania baterja powinna składać się z szeregowo połączonych akumulatorów w ilości:

$$N_p = \frac{108,18}{2,1} = 52 \text{ akumul.}$$

W końcu wyładowania baterja powinna składać się z szeregowo połączonych akumulatorów w ilości:

$$N_k = \frac{108,18}{1,85} = 61 \text{ akumul.}$$

Wobec tego 9 akumulatorów połączymy z kontaktami przełącznika  $M$  jak na rys. 259, a 52, połączone szeregowo będą tworzyły baterję  $AB$ .

**Sprawność akumulatora.** Zależnie od stanu akumulatora oraz natężenia prądu ładowania i wyładowania, zachodzi mniejsza lub większa różnica pomiędzy ilością energii zużytej przy ładowaniu akumulatora, a ilością energii otrzymanej przy jego wyładowaniu. Z tego widzimy, że sprawność jednego i tego samego akumulatora może posiadać wartości zmienne.

Sprawność akumulatora jest wielkością charakteryzującą jego dane konstrukcyjne, tak samo, jak natężenie prądu ładowania i wyładowania, pojemność oraz energia użyteczna.

Rozróżniamy dwa rodzaje sprawności akumulatora: sprawność pojemnościową i energetyczną.

**Sprawnością pojemnościową** nazywamy stosunek ilości elektryczności, która przepłynęła przez akumulator przy jego wyładowaniu do ilości elektryczności, która przepłynęła przez niego przy ładowaniu, przy normalnem natężeniu prądu wyładowania i naładowania. Sprawność pojemnościowa wynosi 85% do 90%. Graficznie z rys. 258 sprawność pojemnościowa

$$\eta_1 = \frac{DF}{OD}$$

**Sprawnością energetyczną** nazywamy stosunek ilości energii, którą otrzymujemy z akumulatora przy jego wyładowaniu do ilości energii, którą zużyliśmy na jego ładowanie. Sprawność energetyczna wynosi 70% do 75%. Graficznie z rysunku 258 sprawność energetyczna:

$$\eta_2 = \frac{\text{Powierzchnia } DBCF}{\text{Powierzchnia } OABD}$$

### Z a d a n i e.

Bateria akumulatorów ładuje się w przeciągu 6 godzin prądem o natężeniu 100 amperów przy średnim napięciu ładowania 2,3 wolt. Akumulator ten wyładowuje się w przeciągu 17 godzin prądem o natężeniu 30 amperów przy średnim napięciu 1,95 wolta. Jaka jest sprawność pojemnościowa i energetyczna tego akumulatora.



Sprawność pojemnościowa tego akumulatora jest:

$$\eta_{11} = \frac{17.30}{6.100} = 0,85 \text{ czyli } 85\%$$

Sprawność energetyczna:

$$\eta_{12} = \frac{17.30 \cdot 1,95}{6.100 \cdot 2,3} = 0,72 \text{ czyli } 72\%$$

### **Ładowanie akumulatorów przenośnych (połowych).**

Ładować akumulatory możemy jedynie prądem jednokierunkowym, t. j. stałym lub pulsującym, do czego używamy zazwyczaj prądnic bocznikowych. Jeżeli elektrownia dostarcza tylko prąd zmienny, to należy go przekształcić na stały zapomocą przetwornicy lub prostownika (najczęściej stosuje się prostownik elektrolityczny).

Do ładowania przenośnych akumulatorów prądem stałym jest bardzo często używany agregat francuski „T. M. D.“, który tu rozpatrzemy.

Agregat składa się z prądnicy bocznikowej, posiadającej 2 niezależne od siebie uzwojenia twornikowe i 2 kolektory *B* i *C* oraz jedno uzwojenie magnetycznej *D* (rys. 260). Przy 1300 obr./min. twornika, z prądnicy możemy wziąć 2 niezależne prądy: jeden (*B*) o napięciu 25 wolt. i natężeniu 15 amperów, drugi (*C*) o napięciu 115 wolt. i natężeniu 3,5 amperów.

Wspólne uzwojenie magnetycznej *D* jest włączone równolegle do zacisków szczotkowych o napięciu 115 wolt. Dla ułatwienia ładowania akumulatorów zapomocą tego agregatu jest dodana do niego tablica rozdzielcza, która posiada 9 zacisków głównych, z tych 5 (a, b, c, d, e) dla połączenia z prądnicą, 4 (f, g, h, i) dla połączenia z dwoma niezależnie

ładowanemi baterjami akumulatorów. Połączenie tablicy rozdzielczej z prądnicą jest uskutecznione zapomocą 5-żyłowego kabla owiniętego skórą. Końce żył tego kabla są oznaczone numerami od 1 do 5, i pomalowane kolorowo. Powinny one być łączone z odpowiednio pomalowanymi zaciskami tablicy rozdzielczej  $a, b, c, d, e$ . Bieguny ładujących się baterji akumulatorów powinny być łączone z jednoimiennymi zaciskami tablicy  $f, g, h, i$ .

Dla regulowania napięcia prądu ładującego na tablicy rozdzielczej jest umieszczony opornik wzbudzenia  $R_w$ , włączony szeregowo z uzwojeniem magnetycznym  $D$ . Prócz tego, do regulowania natężenia prądów ładujących obie baterje, na tablicy są umieszczone 2 oporniki  $R_a$  i  $R'_a$  włączone szeregowo do odpowiednich obwodów prądów ładujących:  $R_a$  — do obwodu prądu 25 wolt;  $R'_a$  — do obwodu prądu 115 wolt.

Przy ładowaniu akumulatorów zapomocą agregatów „T. M. D.” zestawiamy odpowiednio podlegające ładowaniu baterje akumulatorów i przyłączamy zaciski ich do jednoznacznych zacisków tablicy rozdzielczej  $f, g, h, i$ , przytem sprawdzamy, aby oporniki  $R_w, R_a, R'_a$ , były całkowicie włączone do odnośnych obwodów, a wyłączniki dwubiegunowe  $F$  wyłączone.

Po uruchomieniu silnika agregatu wskazówki woltomierzy  $V$  powinny się wychylić, oraz żarówki kontrolne  $L$  zaświecić; wówczas, stopniowo wyłączając opornik  $R_w$ , doprowadzamy napięcie do potrzebnej wartości, stosownie do wskazań woltomierzy. Następnie włączamy wyłączniki  $F$  i doprowadzamy kotwicę  $M$  do styku z rdzeniem elektromagnesu  $E$ . Zapomocą oporników  $R_a$  i  $R'_a$  doprowadzamy natężenie prądów ładujących do potrzebnej wartości, stosownie do wskazań amperomierzy.

**Ładowanie i wyładowywanie akumulatorów stałych.** Akumulatory stałe są zazwyczaj łączone w baterje i służą w elektrowniach dla zastąpienia prądnic boczniowych, lub dla pracy równoległej z prądnicą. W ostatnim wypadku baterja nosi nazwę **wyrównawczej**, gdyż służy do wyrównania obciążenia prądnicy, z którą w tym celu łączy się równolegle.

Rozróżniamy 4 następujące wypadki pracy prądnicy i baterji stałych akumulatorów przy zasilaniu obwodu zewnętrznego:

1. Prądnicą jest nieczynna i obwód zewnętrzny jest zasilany tylko przez baterję akumulatorów.

2. Prądnicą zasila obwód zewnętrzny i równolegle ładuje baterję akumulatorów.

3. Prądnicą i baterja akumulatorów równolegle zasilają obwód zewnętrzny.

4. Prądnicą sama zasila obwód zewnętrzny, baterja jest nieczynna.

Na tablicy rozdzielczej prądnicy  $C$  i połączonej z nią równolegle baterji akumulatorów  $B$  (rys. 261) prócz amperomierzy  $A_1$  i  $A_2$ , woltomierzy  $V_1$  i  $V_2$ , przełączników  $K_1$  i  $K_2$ , wyłącznika minimalnego  $W_{min}$ , opornika wzbudzenia  $R$  i bezpieczników topikowych  $G$  znajdują się jeszcze: przełącznik akumulatorowy  $M$  zwany ładownicą, oraz elektromagnetyczny wskaźnik kierunku prądu  $D$ . Wewnątrz ładownicy znajduje się odpowiednio obliczony opornik, który zapobiega zwarciu akumulatorów dodatkowych przy przesuwaniu ładownicy po kontaktach  $c - d$ .

Zależnie od budowy rozróżniamy ładownice pojedyncze i podwójne. Na rys. 261 jest przedstawiona ładownica pojedyncza, za pomocą której regulujemy napięcie dla normalnego świecenia się żarówek  $L$ , które wskazuje nam woltomierz  $V_1$ , o ile prądnicą  $C$  i ba-

terja akumulatorów  $B$  pracują, jak wymienione w wypadkach 1, 2 i 3.

Obecnie rozpatrzmy obsługę tablicy rozdzielczej z ładownicą pojedynczą w wyżej wymienionych wypadkach:

1. Kiedy prądnicą  $C$  jest nieczynna i żarówki  $L$  są zasilane tylko przez baterję akumulatorów  $B$ , wówczas wyłącznik  $K_1$  jest włączony, wyłącznik  $K_2$  znajduje się na kontakcie  $a$ , a wyłącznik minimalny  $W_{min}$  jest wyłączony; ładownicę  $M$  przesuwamy po kontaktach od  $d$  do  $c$  w ten sposób, żeby woltomierz  $V_1$  wskazywał wymagane napięcie dla normalnego świecenia się żarówek  $L$ ; natężenie prądu wyładowania baterji wskaże nam amperomierz  $A_2$ .

2. Kiedy prądnicą  $C$  zasila żarówki  $L$  i równocześnie ładuje baterję akumulatorów  $B$ , wówczas wyłączniki  $K_1$  i  $W_{min}$  są włączone, wyłącznik  $K_2$  jest na kontakcie  $b$ . W tym wypadku żarówki  $L$  są zasilane słabym prądem i dlatego mogą być włączone tylko w ograniczonej ilości, gdyż główna część prądu wytwarzanego przez prądnicę, zużywa się na ładowanie baterji. Wskazanie woltomierza  $V_2$  regulujemy zapomocą opornika wzbudzania  $R$ , natomiast wskazanie woltomierza  $V_1$  — zapomocą ładownicy  $M$ , przez co zabezpieczamy żarówki  $L$  od przepalania, gdyż w tym wypadku napięcie pomiędzy przewodami zasilającymi żarówki jest znacznie wyższe. Wobec tego na początku ładowania akumulatorów ładownica  $M$  stoi na kontakcie  $c$ , w końcu ładowania — na kontakcie  $d$ , wówczas przez dodatkowe akumulatory połączone z kontaktami ładownicy przechodzi prąd o natężeniu, jaki daje prądnicą  $C$ . W końcu ładowania zapomocą opornika wzbudzania  $R$ , zmniejszamy napięcie prądnicą  $C$  aż do samoczynnego przzerwania obwodu przez wyłącznik minimalny  $W_{min}$ .

3. Kiedy prądnicą  $C$  i bateria stałych akumulatorów  $B$  równolegle zasilają żarówki  $L$ , wówczas wyłączniki  $K_1$  i  $W_{min}$  są włączone, wyłącznik  $K_2$  jest na kontakcie  $a$ . W tym wypadku sprawdzianem, czy bateria  $E$  zasila prądem żarówki, czy też sama pobiera prąd, jest elektromagnetyczny wskaźnik kierunku orądu  $D$ . Gdyby wskaźnik  $D$  wykazywał że bateria ładuje się, wówczas zapomocą opo nika wzbudzania  $R$  doprowadzamy napięcie prądniczy  $C$  do takiej wielkości, żeby wskaźnik  $D$  wychylił się w przeciwną stronę lub stał w położeniu  $O$ , nastąpiłoby wtedy wyładowanie baterji lub też, jakby jej zupełne wyłączenie. I w tym wypadku wskazania woltomierza  $V_1$ , regulujemy zapomocą ładownicy  $M$ . Amperomierz  $A_1$  wskaże nam natężenie prądu zasilającego żarówki przez prądnicę  $C$ , amperomierz  $A_2$  — przez baterję.

4. Kiedy prądnicą  $C$  sama zasila żarówki  $L$ , a bateria  $B$  jest nieczynna wówczas wyłącznik  $K_1$  jest wyłączony, wyłącznik  $K_2$  jest na kontakcie  $a$ , a wyłącznik  $W_{min}$  jest włączony.

Jak widzimy z rys. 261, przy zastosowaniu ładownicy pojedynczej możemy tylko regulować napięcie pomiędzy przewodami, doprowadzającymi prąd do żarówek  $L$ , natomiast w wypadku ładowania baterji, prąd ładujący przechodzi przez wszystkie akumulatory, co jest szkodliwe ze względu na to, że akumulatory dodatkowe są mniej wyczerpane niż pozostałe. Dlatego też przy zastosowaniu ładownicy pojedynczej mamy niepotrzebne przeładowywanie pewnej części akumulatorów, które wskutek tego psują się, a także niepotrzebnie traci się przytem energję elektryczną.

Wady te są usunięte przy zastosowaniu ładownicy podwójnej, przedstawionej na rys. 262. Ładownica ta posiada 2 przełączniki:  $M_1$  do regulowania napięcia pomiędzy przewodami, doprowadzającymi prąd do

żarówek; oraz  $M_2$  do wyłączania stopniowego akumulatorów dodatkowych, przez przesuwanie rączki od kontaktu  $f$  do kontaktu  $h$  w miarę ładowania tych akumulatorów. W położeniu przełączników  $M_1$  i  $M_2$ , jak na rys., przez dodatkowe akumulatory pomiędzy kontaktami  $k, j$  będzie przepływał prąd o natężeniu pełnym, jaki wytwarza prądnica  $C$ . Na początku ładowania przełącznik  $M_2$  jest na kontakcie  $f$ , a w końcu ładowania — na kontakcie  $h$ . Podczas ładowania baterji przełącznik  $K_2$  jest na kontakcie  $b$ . Po naładowaniu przesuwamy go na kontakt  $a$ .

W niektórych wypadkach dla umożliwienia przy ładowaniu baterji akumulatorów zasilania żarówek pełnym prądem bez ograniczenia ich ilości, stosujemy **prądnice pomocnicze**, które podnoszą napięcie przy ładowaniu. Prądnice pomocnicze włączamy wówczas pomiędzy przełącznikiem akumulatorowym  $M_2$  i kontaktem  $b$ .

**Obsługa akumulatorów ołowianych.** Dolewanie elektrolitu powinno być robione co pewien czas, a to ze względu na obniżenie się jego poziomu wskutek parowania. Przy parowaniu ulatnia się nietylko woda lecz i porywane przez nią cząsteczki kwasu. Wobec tego elektrolit uzupełniamy nie wodą destylowaną, lecz roztworem kwasu siarkowego o gęstości 4 — 8° Beaumé'a.

W praktyce jednakże często dolewają wprost do akumulatora wodę destylowaną celem rozcieńczenia, względnie kwas siarkowy, celem zgęszczenia elektrolitu.

W akumulatorach stałych, aby zapobiec zbyt dużemu parowaniu elektrolitu, zwłaszcza w lecie, dolewamy oliwy, która utrzymuje się na powierzchni i izoluje elektrolit od powietrza.

**Ładowanie i wyładowywanie akumulatorów** powinno się uskuteczniać prądem o przepisanej natę-

zeniu, przyczem należy zważać na odpowiednie przyłączenie biegunów. Ładować akumulatory należy nie zwłocznie po ich wyładowaniu.

Przy zestawianiu baterji do ładowania musimy zważać na to, aby gęstość elektrolitu w poszczególnych akumulatorach była jednakowa, oraz aby akumulatory posiadały jednakowe napięcie. Z pokrywy należy wyjąć korki, aby nie krępować gazowania akumulatorów przy końcu ich ładowania. Szczególną uwagę należy zwracać na dobrą izolację płyt dodatnich od ujemnych, gdyż, wypadające drobne cząsteczki masy czynnej, zatrzymując się pomiędzy płytami, mogą wywołać wewnętrzne zwarcie. Dla uniknięcia tego zjawiska najlepiej jest przeczyszczać szczelinę pomiędzy płytkami laseczką izolacyjną.

Gdyby w końcu ładowania jakiś akumulator mniej gazował lub posiadał mniejszą gęstość kwasu niż inne, jest to oznaką, że jest on uszkodzony. Należy go wówczas wyłączyć z baterji i zbadać. Źródło prądu ładującego baterje akumulatorów powinno posiadać napięcie 2,8 razy większe od ilości akumulatorów połączonych szeregowo. Gdyby źródło nie posiadało odpowiedniego napięcia, ale mogło wytwarzać prąd o natężeniu dwa do trzech razy większe, niż jest normalne natężenie prądu naładowania pojedynczego akumulatora, wówczas dla należytego wyzyskania go łączymy akumulatory w baterje mieszane, jak przedstawiono na rys. 263. W tym wypadku do każdego rozgałęzienia musimy włączyć po jednym amperomierzu, który wskaże prawidłowe ładowanie każdej grupy.

Podczas bezczynności akumulatorów należy je co pewien czas adować, przyczem gęstość elektrolitu w tym wypadku może być o 5° Beaumé'a mniejszą od gęstości normalnej. Najlepiej przed każdym ładowaniem wylewać z akumulatora elektrolit, przemyć

płyty destylowaną wodą, napełnić świeżym elektrolitem i potem naładować prądem normalnym. Można także po pełnem naładowaniu wylać elektrolit i nalać do tego samego poziomu wody destylowanej.

Mniej korzystnym jest sposób pozostawiania akumulatorów w beczynności bez elektrolitu. W tym wypadku płyty wysychają, wskutek czego tracą na wytrzymałości, a w razie pozostawienia w nich kwasu siarkowego silnie się zasiarczają. Dla dłuższego przechowywania akumulatorów bez elektrolitu (magazyny mobilizacyjne) musimy przedtem wykonać następujące czynności:

- a) naładować akumulator aż do wydzielania się gazu,
- b) wylać elektrolit,
- c) przepłukać płyty kilkakrotnie destylowaną wodą,
- d) wysuszyć je.

Należy dbać również, aby wszystkie części metalowe były wysmarowane wazeliną, celem zabezpieczenia od pokrywania się śniedzią i rdzewienia.

Usuwanie zasiarczania płyt akumulatora powinno być przeprowadzone natychmiast po zauważeniu. Oznaki zasiarczania są następujące:

płyty dodatnie tracą kolor brunatny i przybierają sinawy, przy dotykaniu palcami odczuwamy że są one chropowate, a nie jak być powinno, gładkie. Przy dłuższem zasiarczaniu płyty wykrzywiają się i pęcznieją;

płyty ujemne tracą kolor jasno niebieski i przybierają mleczny;

elektrolit w końcu ładowania jest o wiele mniej gęsty niż przy płytach normalnych.

Usuwanie zasiarczania może być uskutecznione dwoma sposobami: chemicznym, zapomocą wielokrotnego ładowania i wyładowania słabym prądem przy



elektrolicie o gęstości około  $6^0$  Beaumé'a; mechanicznym, zapomocą szorowania płyt szczotką drucianą, przyczem zanurzamy je w wodzie destylowanej zmiennej kilkakrotnie (około 3 razy), poczem wstawiamy płyty do naczynia z elektrolitem i ładujemy połową normalnego natężenia prądu, aż do osiągnięcia normalnego ich stanu.

Sposobu chemicznego używamy kiedy płyty są mało zasiarczone; w wypadku całkowitego zasiarczenia, gdy płyty są pokryte kryształami siarczanu ołowiu, nierozpuszczalnemi w kwasie siarkowym, płyty oczyszczamy mechanicznie.

Należy pamiętać, że przy wielokrotnem ładowaniu i wyładowaniu akumulatora zasiarczonego, gęstość elektrolitu nie powinna być zwiększana powyżej  $6^0$  Beaumé przez dolewanie kwasu, lecz powinna zwiększyć się sama przez się, kiedy osiągniemy normalny stan płyt.

Reperacja płyt akumulatora polega na spawaniu połamanych części; skuteczniejszą jest to w strumieniu palącego się wodoru przez co zabezpiecza się jednocześnie płyty przed utlenianiem.

Reperacja celluloidowego naczynia akumulatora przenośnego skuteczniej się zapomocą acetonu ( $CH_3 \cdot CO \cdot CH_3$ ), w którym celluloid się rozpuszcza. Uszkodzone miejsca naczynia oczyszczamy zapomocą papieru szmerglowego, poczem pocieramy je acetonem i nakładamy łatkę celluloidową również potartą acetonem.

Po pewnym czasie aceton ulatnia się, a łatka z naczyniem tworzy całość.

**Transport akumulatorów przenośnych** skuteczniej najlepiej zapomocą wozów na resorach, a w razie braku takowych, umieszcza się akumulatory w skrzy-

niach, wyłożonych grubo słomą, przy tem skrzynie stawia się w wozie również na słomie. Przy odległościach do 3-ch klm. akumulatory powinny być przenoszone ręcznie.

**Akumulatory żelazo-niklowe Edisona** (zasadowe). Podstawą do budowy akumulatorów żelazo-niklowych posłużyły doświadczenia dokonane z płytkami stalowymi zanurzonemi w roztworze ługu potasowego ( $KOH$ ). Płytki stalowe, pokryte warstwą rdzy pod działaniem tlenu powietrza, zanurzono do roztworu ługu potasowego i załączono do nich źródło prądu na przeciąg pewnego czasu. Po wyłączeniu źródła zauważono, że pomiędzy płytkami istnieje pewna różnica potencjałów. Podobnie jak w akumulatorach ołowianych, w żelazo-niklowych zachodzą reakcje chemiczne. Płytką połączoną z dodatnim biegunem źródła prądu jeszcze więcej się utlenia, płytka połączona z biegunem ujemnym odtlenia się w czyste żelazo. Odmienne niż w akumulatorach ołowianych, w żelazo-niklowych elektrolit, którym jest roztwór ługu potasowego nie podlega rozkładowi chemicznemu; działanie jego polega tylko na przenoszeniu ładunków elektrycznych i dla tego też gęstość elektrolitu zostaje przez długi czas prawie niezmienną.

Ponieważ elektrolit w akumulatorach żelazo-niklowych należy do rzędu zasad, więc akumulatory te nazywają się również zasadowemi. W używanych dziś akumulatorach żelazo-niklowych podobnie jak w akumulatorach ołowianych, płyty są wypełniane masą. Elektrolit składa się z ługu potasowego z małą domieszką wodorotlenku litu ( $LiOH$ ).

Płyty dodatnie składają się z kratownicy stalowej niklowanej stanowiącej szkielet (rys. 264a); w kratkach ramki znajdują się wtłoczone cienkie rurki z drobno podziurkowanej niklowanej blachy stalowej. Rurki są

wypełnione masą składającą się z wodorotlenku niklu  $Ni(OH)_2$ , pomieszaną, dla lepszego przewodnictwa, z grafitem lub z cienkimi blaszkami niklowymi.

Płyty ujemne składają się również z kratownicy z blachy stalowej niklowanej, z tą różnicą, że kratki w tym wypadku są o wiele większe (rys. 264 b). Do krutek tych są wtłoczone czworokątne pudełka z cienkiej, podziurkowanej niklowanej blachy stalowej. Pudełka te są wypełnione sproszkowaną masą, składającą się z chemicznie czystego żelaza i tlenków żelaza ( $FeO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$ ) pomieszanych w stosunku 10% z tlenkiem rtęciowym ( $HgO$ ) dla lepszego przewodnictwa i uodpornienia płyty przy szybkim i nadmiernym wyładowaniu.

Elektrolitem jest 20% roztwór wodorotlenku potasu ( $KOH$ ) z małą domieszką wodorotlenku litu ( $LiOH$ ) (około 50 gramów na każdy litr roztworu).

Naczynie (rys. 264 c) składa się z hermetycznie zamkniętej skrzynki z blachy stalowej poniklowanej. W pokrywie tej skrzynki znajdują się 3 otwory, 2 otwory izolowane, przez które wprowadzone są bieguny elektrod  $A$  i  $B$ , oraz 1 otwór zaopatrzony w korek, dla wlewania płynu i ułatwienia się gazu.

Na dnie skrzynki znajdują się podkładki ebonitowe, a po bokach także ramki służące do izolowania płyt od naczynia. Wszystkie płyty dodatnie i ujemne są izolowane od siebie zapomocą cienkich lasek ebonitowych (rys. 265).

Podobnie, jak akumulatory ołowiane, żelazo nikłowe mogą być łączone w baterje (rys. 266).

**Ładowanie i wyładowanie akumulatorów zasadowych.** Akumulatory zasadowe lepiej jest ładować prądem o większym natężeniu, zwłaszcza kiedy uprzednio akumulatory te były wyładowane prądem o dużym

natężeniu. Zbyt silny prąd szkodzi akumulatorom zasadowym tylko w tym wypadku gdy powoduje rozgrzewanie się akumulatora ponad  $45^{\circ}C$ .

Przy ładowaniu akumulatora mamy następujące procesy chemiczne:

na katodzie odtleniają się tlenki żelaza w metalicznie czyste żelazo gąbczaste,

†na anodzie osiada tlen i z wodorotlenkiem niklu  $Ni(OH)_2$  tworzy wodorotlenek niklowy  $Ni(OH)_3$ .

Przy wyładowaniu mamy następujące procesy chemiczne:

na anodzie wodorotlenek niklowy odtlenia się zpowrotem na wodorotlenek niklu,

na katodzie osiada tlen, utleniając w ten sposób gąbczaste żelazo na wodorotlenek żelazawy  $Fe(OH)_2$ .

Jak z tego widzimy, w końcu wyładowania mamy taki sam stan chemiczny elektrod akumulatora, jaki był przy jego ładowaniu.

Przebieg napięcia na zaciskach akumulatora zasadowego przy jego ładowaniu i wyładowaniu jest przedstawiony graficznie w układzie współrzędnych zapomocą krzywych  $AB BC$  na rys. 267.

Tak samo jak dla akumulatora ołowianego na osi odciętych odkładamy ilość elektryczności ( $Jt$ ), która przepłynęła przez akumulator przy jego ładowaniu i wyładowaniu, natomiast na osi rzędnych odkładamy odpowiednie wielkości napięcia  $V$  na zaciskach akumulatora. Przeciętne napięcie przy ładowaniu akumulatora jest około 1,67, przy wyładowaniu około 1,2 wolta. Zasadniczo akumulator Edisona wyładowujemy do 1 wolta, lecz dzięki samonaładowaniu się napięcie to natychmiast wzrasta do 1,4 wolta.

Ładowanie więc akumulatorów zasadowych rozpoczynamy przy napięciu 1,4 wolta, napięcie to szybko

wzrasta do 1,67 wolta i na tym poziomie pozostaje przez dłuższy czas, wzrastając przy końcu ładowania do swej największej wartości 1,82 wolt.

Najlepiej jest kiedy po osiągnięciu tego napięcia jeszcze ładujemy akumulator w przeciągu pół godziny.

Przy przerwaniu ładowania, dzięki samowyładowaniu napięcie szybko spada do 1,4 wolta, a przy wyładowaniu opada do 1,2 wolta i na tym poziomie utrzymuje się prawie do końca wyładowania (1 wolt). O ile będziemy dalej wyładowywali akumulator, to napięcie bardzo szybko spadnie do zera. Takie wyładowanie zupełnie się nie opłaca. Jeżeli przerwiemy wyładowanie, gdy napięcie spadnie do 1 wolta, wówczas dzięki samoladowaniu napięcie wzrośnie raptownie do 1,4 wolta. Napięcie to praktycznie nie da się wykorzystać.

Sprawność akumulatorów zasadowych jest mniejsza od sprawności akumulatorów ołowianych. Sprawność pojemnościowa wynosi 70% do 80%; sprawność energetyczna — 50 do 60%, czyli akumulator zasadowy zwraca nam tylko połowę tej energii, którą zużyjemy przy jego ładowaniu. Największą sprawność posiadają akumulatory zasadowe przy temperaturze elektrolitu  $26^{\circ}$  do  $32^{\circ}$  C.

**Obsługa akumulatorów zasadowych.** Obsługa akumulatorów zasadowych jest znacznie lżejsza od obsługi ołowianych. Akumulatory zasadowe nie posiadają roztworu kwasu, są więc odporne na uderzenia i wstrząśnienia, masa czynna nie wykrusza się i dlatego w akumulatorach zasadowych nie potrzeba tak często reperować i zmieniać płyt. Poza tem akumulatory zasadowe mogą być bez szkody dla siebie całkowicie wyładowane do napięcia 0 na zaciskach.

Ług potasowy w akumulatorach musi pokrywać całkowicie wszystkie płyty, w przeciwnym razie nie zanurzone części płyt, wysychając, psują się.

Dolewanie ługu potasowego skuteczniejsza się tylko przy napełnianiu próżnych akumulatorów i w wypadkach wylania elektrolitu z naczynia, natomiast w razie zmniejszenia się poziomu elektrolitu przez parowanie należy dolewać tylko wody destylowanej. Przy ładowaniu akumulatory zasadowe gazują daleko mniej niż ołowiane, wobec tego zdejmowanie korków z otworów w przykrywach nie jest w tym wypadku koniecznym, gdyż dla ujęcia gazu są wystarczające otwory w samych korkach.

Przy dłuższej bezczynności najlepiej jest akumulatory zasadowe zupełnie wyładować, wylać elektrolit i przepłukać płyty destylowaną wodą, a następnie napełnić je świeżym roztworem 20% ługu potasowego. Przechowywanie akumulatorów bez cieczy jest mniej korzystne, a to ze względu na wysychanie płyt i związane z tem przemiany chemiczne masy czynnej.

Jak widzimy z powyższego, akumulatory zasadowe nadają się lepiej niż ołowiane do przenoszenia i przewożenia i nie wymagają zbyt sumiennej obsługi. Z tych więc powodów mają obecnie wielkie zastosowanie na stacjach radiotelegraficznych i polowych. Z drugiej strony akumulatory zasadowe o tej samej pojemności co ołowiane są 2,5 raza droższe, a prócz tego, przy jednakowych wymiarach, posiadają mniejszą pojemność. Wobec tego, gdzie warunki pozwalają i gdzie wchodzi w rachubę sprawa kosztów, akumulatory zasadowe ustępują miejsca ołowianym.

### **Lampy i wyłączniki.**

**Lampy łukowe.** Zasada budowy lamp łukowych oparta jest na zjawisku „łuku-Volty”, który powstaje wówczas, gdy dwa przewodniki połączone ze źródłem prądu zetknąć ze sobą, a następnie rozsunąć na nie-

wielką odległość. Wskutek niedokładnego kontaktu, miejsce zetknięcia przewodników przedstawia dla prądu znaczny opór, dzięki czemu wywiązuje się tam duża ilość ciepła. Przy rozsunięciu końcówek, prąd nie zostanie przerwany, gdyż zjonizowane przez wytworzone ciepło powietrze sprzyja przewodzeniu elektryczności. Jednocześnie rozżarzone końce przewodników topią się i parują, a ogrzana para unoszona przez prąd ciepłego powietrza tworzy świecąca smugę kształtu łuku wygiętego ku górze (rys. 268).

W lampach elektrycznych stosuje się najczęściej łuk świetlny, powstający pomiędzy elektrodami węglowymi, ponieważ węgiel dzięki dużej odporności na działanie ciepła nie topi się, lecz wolno paruje, dając przytem silne światło.

Lampa łukowa posiada dwie elektrody z twardego prasowanego węgla retortowego, osadzone w oprawkach metalowych *KK* i połączone ze źródłem prądu (rys. 269).

Przy wytwarzaniu łuku prądem stałym, kształt elektrod ulega z biegiem czasu zmianie, a mianowicie na końcu anody tworzy się wgłębienie, t. zw. krater, na końcu katody — stożek. Jest to rezultatem przenoszenia się rozżarzonych cząsteczek węgla z anody na katodę, co też powoduje prawie dwa razy szybsze zużycie anody. Dlatego też w lampach łukowych zasilanych prądem stałym anodę należy brać grubszą niż katodę.

Temperatura w kraterze anody wynosi ok.  $3600^{\circ}\text{C}$ ., dzięki czemu węgiel w tem miejscu jest rozżarzony do białości i daje silne światło; temperatura katody wynosi ok.  $2000^{\circ}$ .

Z ogólnej ilości światła, które daje lampa łukowa 85% przypada na krater anody, 10% na stożek katody, a 5% na sam łuk. Dlatego też lampy łukowe należy umieszczać w ten sposób, żeby krater był zwrócony

w stronę, którą chcemy oświetlić. Lampy łukowe posiadają siłę światła od 400 do 3900 świec, są bardzo ekonomiczne, gdyż zużywają od 0,5 do 0,2 watta na świecę i wymagają dla normalnego palenia się około 40 wolt napięcia i od 6 — 16 amperów natężenia prądu.

O ileby nastąpiła przerwa obwodu, nie przewyższająca 0,1 sekundy, to dla nowego zapalenia się łuku nie potrzeba doprowadzać elektrod do styku, gdyż zjonizowana warstwa powietrza jest w przeciągu tak krótkiej przerwy przewodnikiem i łuk zapali się na nowo samoczynnie. Dlatego też lampy łukowe mają zastosowanie nie tylko dla prądu stałego, ale i dla zmiennego, zmieniającego swój kierunek od 10 razy wwyż na sekundę.

Z powodu szybkiego spalania się elektrod, powodującego zwiększanie się odległości pomiędzy nimi, łuk musiałby zgasnąć. Aby temu zapobiec przy każdej lampie łukowej istnieje dodatkowe urządzenie, automatycznie zbliżające do siebie elektrody w miarę ich spalania.

Przy zastosowaniu jako źródła energii prądu zmiennego nie otrzymujemy z lampy łukowej, tak silnego światła, jak przy zastosowaniu prądu stałego. Tłumaczy się to tem, że anoda będąca głównem źródłem światła w lampie łukowej nie jest tu stałą, gdyż każda zmiana kierunku prądu zmienia i znaki elektrod. Dla lamp łukowych źródło prądu zmiennego może być o napięciu około 30 wolt.

**Włączanie lamp łukowych do obwodu.** W sieciach przewodów urządzeń elektrycznych stosuje się najczęściej dla prądu stałego napięcie 110 woltów a dla prądu zmiennego 120 woltów. Odpowiednio do tego łączymy w pierwszym wypadku po 2 lampy w szereg,



w drugim po 3, przyczem w obu wypadkach nadwyżkę napięcia pochłania dodatkowy opór, włączony szeregowo z lampami. Odpowiednia strata napięcia wskutek dodatkowego oporu jest niezbędna dla właściwego działania automatów, regulujących odległość pomiędzy elektrodami. Przy dużej ilości połączonych lamp w szereg, poszczególne lampy zaopatrzone są w oporniki zastępcze, włączane samoczynnie do obwodu na miejsce tych lamp, w których węgle się wypaliły. W ten sposób unikamy jednoczesnego zgaśnięcia lamp całego obwodu. Przy zasilaniu lamp łukowych prądem zmiennym stosuje się zamiast oporników zwojnice indukcyjne, czyli dławiki, utworzone z ramki żelaznej z nawiniętym na niej uzwojeniem. Często też stosuje się przy prądzie zmiennym połączenie lamp łukowych równoległe, przyczem w tym wypadku każda lampa jest połączona szeregowo z oporem dodatkowym i auto-transformatorem, który przetwarza prąd np. z 120 na 40 volt.

**Żarówki.** Ustrój lamp żarowych oparty jest na własności rozżarzania się przewodników pod wpływem prądu elektrycznego. Jeżeli końcówki źródła prądu połączyć cienkim drucikiem, to wskutek dużej oporności, nagrzej się on silnie i będzie świecił, wkrótce jednak przepali się. W celu uniknięcia szybkiego spalania się drucika, umieszczamy go w bańce pozbawionej powietrza t. j. prawie w próżni, lub w bańce napełnionej gazem niesprzyjającym spalaniu (azot), przyczem zamiast drucika stosuje się najczęściej włókno węglowe lub wolframowe. Końce włókna połączone są z umieszczonemi nazewnątrz bańki i izolowanemi od siebie blaszkami *b* i *c*, które przy wkręcaniu żarówki w oprawkę, kontaktują z blaszkami *d* i *e* (rys. 270). Blaszki oprawki *d* i *e* posiadają zaciski, do których dołączamy prze-

wodniki doprowadzające prąd. Prąd ten nagrzewa włókno i doprowadza go do stanu żarzenia. Mamy tu więc jaskrawy przykład przejścia energii elektrycznej w ciepłą, a tej ostatniej w energię świetlną.

Na każdej żarówce są napisane dwie dane: napięcie źródła prądu i ilość świec, czyli jednostek światłości, jaką dana żarówka może dać. Jednostką światłości jest świeca międzynarodowa; światłość 1 cm.<sup>2</sup> ciała doskonale czarnego w temp. topienia platyny (1775°) wynosi 55,4 świec międzynarodowych. Na międzynarodowej konferencji oświetleniowej w 1924 r. ustalony został wzorzec świecy międzynarodowej, jako jednostki światłości, w postaci żarówki elektrycznej.

Zużyta energia w żarówce elektrycznej z włóknem węglowym wynosi około 3,5 watta na świecę. Żarówki z metalowem włóknem np. wolframowem (oporność właściwa w stanie żarzenia 0,65 oma) wypełnione wewnątrz azotem, lub innym gazem niesprzyjającym paleniu się są bardziej ekonomiczne, gdyż zużywają od 1 do 0,5 watta na świecę. Żarówki używane w praktyce mają zazwyczaj siłę światłości 5, 10, 16, 25, 50 i 100 świec.

W ostatnich czasach coraz częściej stosuje się do oświetlania ulic zamiast lamp łukowych silne żarówki półwattowe o sile światłości dochodzącej do 3000 świec.

**Włączanie lamp żarowych do obwodu.** Lamy żarowe łączy się zwykle równolegle. W wyjątkowych tylko wypadkach, gdy źródło prądu wytwarza napięcie wyższe od 260 woltów, stosuje się połączenie lamp szeregowo.

Każda lampa przy połączeniu równoległym zaopatruje się zwykle w oddzielny wyłącznik.

Połączenie szeregowe lamp stosuje się np. w tramwajach, gdzie napięcie wynosi około 600 woltów. Możemy więc w tym wypadku połączyć w szereg 5 lamp, z których każda zrobiona jest na 120 woltów napięcia. Przytem łączyć można w ten sposób tylko lampy o dokładnie jednakowej oporności, aby otrzymać równą jasność. Przy przepaleniu jednej żarówki, wszystkie połączone z nią w szereg zgasną z powodu przerwy w obwodzie.

Jeżeli obwód zasilany jest prądem zmiennym, to połączenie szeregowe można skutecznie w ten sposób, że do każdej lampy włącza się równolegle cewkę indukcyjną; w razie przepalenia się którejkolwiek lampy nie nastąpi wówczas przerwa w obwodzie, gdyż prąd popłynie przez odpowiednią cewkę (rys. 271).

### Z a d a n i e.

Źródło prądu przy 120 woltach daje prąd o natężeniu 15 amp.; ile żarówek równolegle można załączyć do obwodu, jeżeli żarówki są 100-woltowe, 100-świecowe i zużywają na każdą świecę 0,5 watta, oraz jaka gęstość prądu będzie w przewodach łączących źródło prądu i lampki, jeżeli odległość pomiędzy niemi jest 570 mtr. Każda żarówka zużywa  $P = 0,5 \cdot 100 = 50$  watów.

Przez każdą żarówkę przejdzie prąd o natężeniu

$$J = \frac{50}{100} = 0,5 \text{ ampera. Możemy załączyć równolegle}$$

$$\text{do obwodu żarówek } J = \frac{15}{0,5} = 30 \text{ żarówek. Spa-}$$

dek napięcia w przewodach łączących źródło prądu z żarówkami  $J R = 15 R = 120 - 100 = 20$  wolt.

Opór przewodów łączących będzie:

$$R = \frac{20}{15} \cong 1,33 \text{ oma}$$

Przekrój przewodów łączących:

$$s = \frac{\rho l}{R} = \frac{2 \cdot 570}{57 \cdot 1,33} = 15 \text{ m/m.}^2$$

Gęstość prądu w przewodach łączących będzie:

$$i = \frac{J}{s} = \frac{15}{15} = 1 \text{ amp/mm.}^2$$

**Bezpieczniki.** Bezpieczniki mają za zadanie zabezpieczyć źródło prądu oraz odbiorniki (przysrządy i maszyny elektryczne), a także przewody je łączące przed zbyt silnymi prądami. W zależności od konstrukcji rozróżniamy bezpieczniki topikowe i przepięciowe.

**Bezpieczniki topikowe** dzielimy na paskowe, korkowe i rurkowe. Bezpieczniki paskowe, jak widzimy z rys. 272, składają się z 2-ch mosiężnych blaszek z wycięciami *a*, *b*, służącymi do zamocowania do zasków linii. Pomiędzy blaszkami *a*, *b*, są przylutowane topliwe druty lub paski ze srebra, stopu ołowiu z cyną, lub stopu cynku z bizmutem. Na rys. 273 jest pokazany poprzeczny przekrój i widok zewnętrzny bezpiecznika korkowego. Składa się on z porcelanowej oprawy *A*, wewnątrz której znajduje się topliwy drucik *D*. Na bocznej powierzchni oprawy jest założona kontaktowa nagwintowana opaska *B*, a u spodu znajduje się kontaktowa śruba *K*. Prąd przechodzi przez bezpiecznik w następujący sposób: z linii do kontaktowej opaski *B*,

następnie przez drucik  $D$  śrubę  $K$  do linii. Przy stopieniu się drucika  $D$  umieszczona z wierzchu pokrywka  $C$  zabezpiecza przed rozpryskiwaniem się roztopionego metalu.

Na rys. 274 przedstawiony jest najczęściej używany na centralach telefonicznych i w aparatach telegraficznych bezpiecznik rurkowy. Składa się on z rurki szklanej, z nasadzonemi na jej końcach blaszkami kontaktowemi, połączonemi zapomocą topliwego drucika, znajdującego się wewnątrz rurki. Bezpiecznik ten zamocowuje się kontaktowemi blaszkami pomiędzy dwie pary sprężyn, do których dołączone są końce linii.

Drugi rodzaj bezpiecznika rurkowego używanego w centralach telefonicznych stanowi bezpiecznik systemu Wooda (rys. 275). Składa się on z rurki, wewnątrz której przechodzi topliwym drucik zakończony z jednej strony kulką połączoną ze sprężyną, a z drugiej połączony z opaską kontaktową. Jeden zacisk linjowy połączony jest z nieruchomym końcem sprężyny, drugi — z opaską kontaktową.

Wewnątrz rurka jest wypełniona topliwą masą, która z chwilą stopienia się drucika rozplywa się i pozwala sprężynie wyciągnąć część drucika, przez co zapobiega powstaniu pomiędzy roztopionemi jego końcami łuku elektrycznego.

Na bezpiecznikach topikowych oznaczone są napięcie i natężenie prądu w obwodzie, do którego bezpieczniki mogą być włączane.

Ponieważ stapianie się bezpiecznika topikowego jest spowodowane wydzielaniem się w nim ciepła pod wpływem przepływającego prądu, to na podstawie wzoru  $Q = 0,24 J^2 R t$ , możemy obliczyć możliwość stopienia się bezpiecznika przy znanej jego oporności. Aby nie powodować każdorazowego przerywania

obwodu z racji krótkotrwałego zwiększenia się natężenia prądu, obliczamy oporność bezpiecznika w ten sposób, żeby się stapał od prądu krótkotrwałego o natężeniu 3 razy większym od normalnego, albo od prądu dłużej trwałego o natężeniu większym ponad 1,25 natężenia normalnego.

Długość drucika w bezpieczniku topikowym powinna być taka, żeby z chwilą jego stopienia, powstający łuk elektryczny szybko zgasł i nie powodował pożaru lub uszkodzenia instalacji.

W instalacjach o napięciu do 500 wolt i natężeniu prądu do 60 amperów używane są bezpieczniki paskowe i korkowe, w instalacjach o większym napięciu są używane tylko bezpieczniki paskowe, które mają niekiedy długość do kilkudziesięciu centymetrów; są one umieszczane wówczas w szklanych albo porcelanowych rurkach odkrytych z obu stron, zabezpieczających przed rozpryskiwaniem się roztopionego metalu, oraz umożliwiającą dobą wentylację podczas pracy bezpiecznika.

W instalacjach o wysokim napięciu dodaje się równolegle do paskowego bezpiecznika  $a$ ,  $a_1$  (rys. 276) t. zw. rożkowy bezpiecznik (Siemensa), składający się z 2-ch wygiętych drutów  $b$ ,  $b_2$ . W chwili przepalenia się bezpiecznika i powstania łuku elektrycznego pomiędzy jego końcami, rozgrzane powietrze unosi łuk do góry na bezpiecznik rożkowy, wydłuża go i gasi w ten sposób.

W instalacjach telegraficznych i telefonicznych, bezpieczniki topikowe typu rurkowego są dla prądów o natężeniu 0,2 ampery do 8 amper.

**Bezpieczniki przepięciowe** służą do zabezpieczenia odbiorników przed prądami wysokiego napięcia. Z pomiędzy wielu typów rozpatrzmy tutaj tylko bezpiecz-

niki przepięciowe typu pojemnościowego, używane w instalacjach telegraficznych i telefonicznych, gdzie są załączane do odbiorników aparatów telegraficznych i telefonicznych zawsze równolegle i noszą nazwę odgromników linjowych. Na rys. 277 przedstawiony jest odgromnik używany w instalacji jedno-przewodowej. Składa się on z 2-ch płytek węglowych zwróconych ku sobie zaostrzonymi zębami, które posiadają własność ssącego działania i jonizowania zawartej między nimi warstwy powietrza. Prąd szybko-zmienny wyładowania atmosferycznego (zmieniającego swój kierunek około miliona razy na sekundę), przechodząc po linii będzie miał do przebycia dwa równolegle załączone opory: aparatu i przerwy powietrznej. Ponieważ dla tego prądu aparat będzie przedstawiał dużo większą oporność (oporność indukcyjna uzwojeń aparatu), niż przerwa powietrzna, to przejdzie on przez odgromnik i zacisk  $L_2$  do ziemi, nie uszkadzając aparatu.

Przy instalacji jedno-przewodowej jest również używany odgromnik przedstawiony na rys. 278, składający się z rurki szklanej, z silnie rozrzedzonym powietrzem; wewnątrz rurki znajdują się dwie płytki węglowe z mocowane ze sobą dwoma płytkami mikowemi. Płytki węglowe są połączone drucikami z nasadzonemi na końce rurki dwoma blaszkami kontaktowemi, za pomocą których odgromnik zamocowuje się pomiędzy dwie pary sprężyn kontaktowych. Jedna para tych sprężyn jest połączona z zaciskiem  $L_1$  aparatu, druga z zaciskiem  $L_2$  aparatu i ziemią.

Przy instalacji telefonicznej dwuprzewodowej odgromnik składa się z trzech płytek węglowych (rys. 279), z których środkowa połączona jest z ziemią, a dwie skrajne z zaciskami aparatu telefonicznego. W ten sposób prąd wyładowania atmosferycznego, przechodząc po linii będzie spływał do ziemi przez środkową płytkę odgromnika i nie uszkodzi aparatu.

W niektórych instalacjach telefonicznych są używane odgromniki w kształcie małego kondensatora, którego okładkami są dwie płytki węglowe lub metalowe, a dielektrykiem — płytka mikowa z wycięciami.

Każda instalacja telegraficzna i telefoniczna powinna posiadać bezpieczniki topikowe, załączone szeregowo do każdego przewodu i odgromnik linjowy, załączony równolegle do zacisków zabezpieczonego aparatu.

**Wyłączniki.** Wyłączniki lub przerywacze są to przyrządy służące do zamykania i przerywania obwodu elektrycznego.

Zwykły wyłącznik składa się z noża, który wchodzi pomiędzy odpowiednie sprężyny kontaktowe. Przy otwieraniu noża powstaje silna iskra, która prędko niszczy taki wyłącznik; dlatego też do zamykania lub otwierania obwodu pod prądem stosuje się wyłączniki momentalne, w których nóż jest szybko otwarty przy pomocy naciągniętej sprężyny. W tym wypadku powstający łuk szybko rozciąga się i przerywa. Dla prądów o małym natężeniu i małym napięciu używane są wyłączniki pudełkowe pokrętne (momentalne), w których podczas obracania ręczki odpowiednie blaszki zostają zetknięte lub rozsunięte. Dla prądów wysokiego napięcia używane są wyłączniki olejowe. Kontakty takich wyłączników są umieszczone w oleju, gdzie powstający przy wyłączaniu łuk gaśnie prędkiej niż w powietrzu.

Oprócz wyłączników ręcznych używane są także samoczynne, działające automatycznie. Są one dwojkiego rodzaju: maksymalne, przerywające obwód, gdy prąd wzrośnie, oraz minimalne — przerywające obwód, gdy prąd spadnie poza dopuszczalne granice.

Zasada działania wyłącznika maksymalnego jest następująca:



Prąd płynie z linii przez nóż  $aob$  (rys. 280) do elektromagnesu  $M$  i dalej do linii. W chwili gdy natężenie wzrośnie, siła przyciągania elektromagnesu przewycięży siłę sprężyny  $S_2$  i kotwica  $k$  zostanie obrócona dokoła punktu obrotu  $O'$ , w ten sposób, że jej górny koniec przesunie się w prawo i przestanie podierać koniec noża  $b$ . Dzięki przyciąganiu sprężyny  $S_1$ , nóż obróci się około  $O$ , przez co zostanie wyciągnięty z pomiędzy sprężyn kontaktowych.

W wyłącznikach minimalnych (rys. 281) prąd płynie z linii przez miseczkę z rtęcią, w której zanurzony jest jeden koniec kotwicy, następnie przez uzwojenie elektromagnesu zpowrotem do linii. W chwili osłabienia prądu, elektromagnes nie może utrzymać końca  $b$  kotwicy, wskutek czego obróci się ona około punktu  $O$  i wyjdzie z połączenia z rtęcią. W ten sposób następuje przerwa w obwodzie.





20 -

BG Politechniki Śląskiej

nr inw.: 102 - 135033



**Dyr.1 135033**