

STANISŁAW SZYFMAN

inz. E.S.E./Fr./, GRAD. I.E.E.

OGÓLNE PODSTAWY ELEKTROTECHNIKI

Nakład czwarty



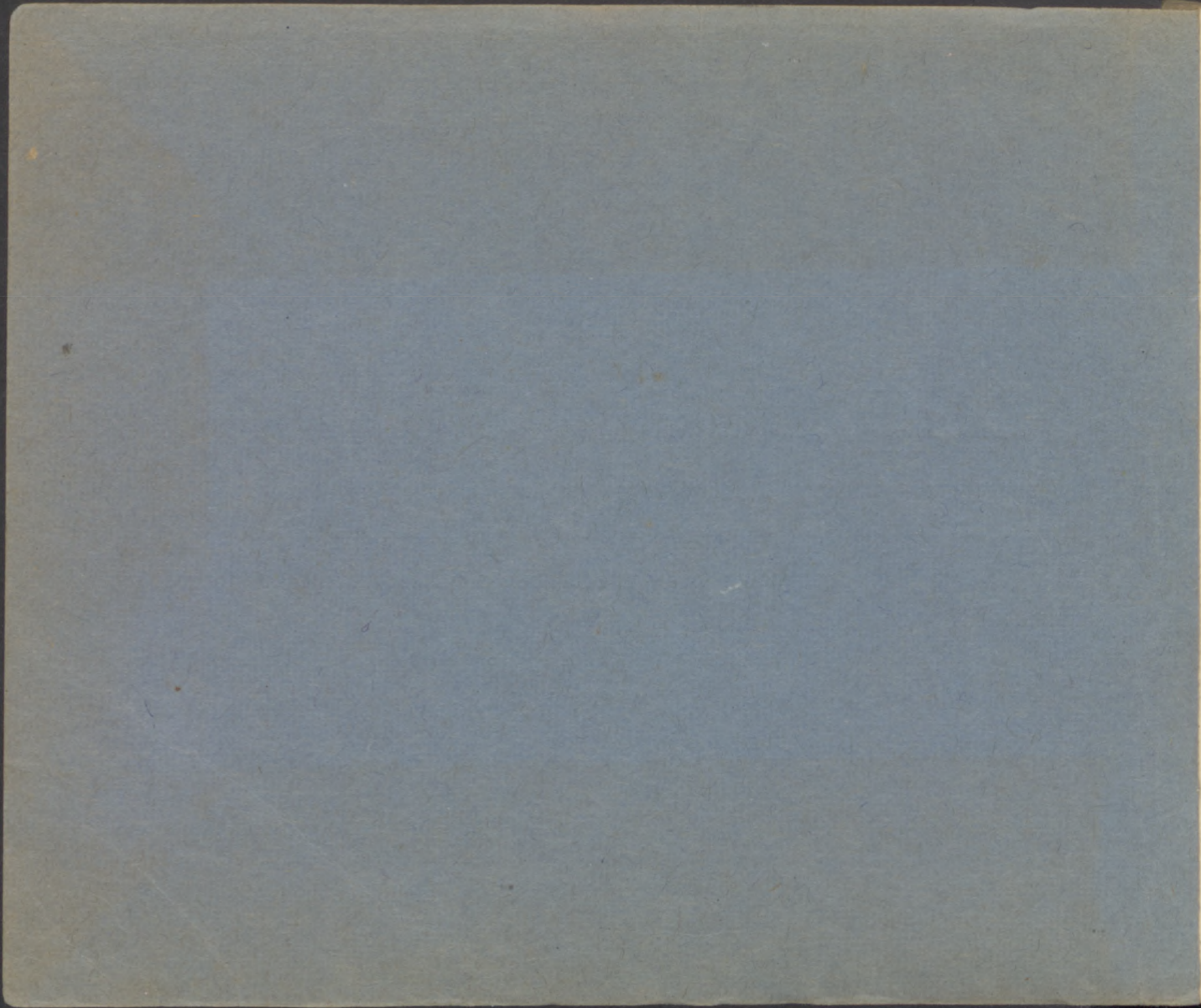
Skład główny:

KSIAŻNICA POLSKA

THE POLISH LIBRARY

242 HOPE STREET, GLASGOW

WIELKA BRYTANIA 1946



STANISŁAW SZYFMAN

inz. E.S.E./Fr./, GRAD. I.E.E.

OGÓLNE PODSTAWY ELEKTROTECHNIKI

Nakład czwarty



Skład główny:

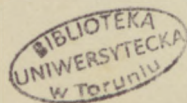
KSIAŻNICA POLSKA

THE POLISH LIBRARY

242 HOPE STREET, GLASGOW

WIELKA BRYTANIA 1946

Zalecone do użytku służbowego zarządzeniem Pana Ministra
Obrony Narodowej z dnia 14.X.1943.L.dz.2406/CZL/43 na wniosek
Szefa Łączności Sztabu N.W.



AE
1382780

Na prawach rękopisu.

Rysunki wykonał ROMAN MATYSIAK.

Dz 28/18

- 2 -

P R Z E D M O W A .

Opracowanie i wydanie książki technicznej jest w dzisiejszych warunkach nielada przedsięwzięciem. Z pewnością o wiele łatwiejsza będzie krytyka tej pracy.

Wobec wyraźnej potrzeby polskiego podręcznika elektrotechniki, ujmującego zagadnienie pod kątem widzenia wymogów nauczania radiotechniki, wobec świadomości autora, że "lepiej jest wrogiem dobrego", należy powitać ukazanie się "Ogólnych Podstaw Elektrotechniki" z zadowoleniem i uznaniem dla autora, który zdołał pokonać wszystkie trudności, piętrzące się przed tym wydawnictwem, i który oddaje je do użytku bez perspektywy zysku materialnego, a jedynie w poczuciu spełnionego obowiązku wobec ukochanej przez niego techniki polskiej.

Oby praca ta służyła jej jaknajwydatniej.

mjr. T. St. L.

PRZEDMOWA AUTORA.

Praca niniejsza nie rości sobie pretensji do oryginalności, o którą zresztą w szkolnym podręczniku bardzo trudno. Stanowi ona w większej mierze streszczenie moich wykładów na szeregu kursów łączności oraz kompilację materiału, zebranego i przystosowanego dawniej z szeregu podręczników polskich, niemieckich i francuskich, których spisu, niestety, podać obecnie nie mogę wobec braku dokładnych danych; natomiast bogata bibliografia angielska i amerykańska, z której dzięki obecnym warunkom mogłem korzystać bez ograniczeń, została odpowiednio uszeregowana i częściowo podana na końcu podręcznika.

Celem pracy było podanie ekstraktu elektrotechniki elementarnej w jaknajwięźlejszej i najprostszej formie dla tych, którzy chcieliby następnie poznać przebogata dziedzinę radiotechniki. Wobec tego założenia, rozmyślnie pominięta została część, traktująca o prądach wielofazowych, i znacznie ograniczone zostały rozdziały, obejmujące zagadnienia silnopiętrowe.

Ponieważ zdawałem sobie sprawę, że kilka lat wojny wywarło raczej ujemny wpływ na zasób posiadanych przez nas wiadomości, konieczna, a elementarna matematyka, jest w całym podręczniku aplikowana z umiarem, przy czym najprostsze nawet funkcje trygonometryczne zostały omówione dodatkowo.

Praca niniejsza zacpatrzona została w szereg przykładów, obejmujących początkowo i rozwiązania, a następnie, w miarę opanowywania materiału przez Czytelnika - jedynie odpowiedzi. Przykłady te są częściowo opracowane przeze mnie, a częściowo stanowią uproszczony materiał egzaminacyjny Brytyjskiego Instytutu Inżynierów

Elektryków /Institution of Electrical Engineers/ oraz Londyńskiego Miejskiego Przemysłowego Instytutu Radiokomunikacyjnego /City & Guilds of London Institute in Radio Communication/.

Serdeczne podziękowania winienem następującym osobom:

P.T.St.Langemu - za pomoc w wydaniu niniejszego podręcznika oraz za przedmowę i niezmiernie życzliwą ocenę moich skromnych wysiłków; P.T.Hubertowi - za przejrzenie i częściową korektę niniejszej pracy; P.St.Jasieńskiemu - za bezinteresowne oddanie do mojej dyspozycji Jego bardzo fachowego i wyczerpującego podręcznika na temat akumulatorów; 1) P.M.Staneczukowi - za przejrzenie i korektę części, traktującej o przyrządach pomiarowych; moim bezpośrednim Przełożonym - za wydatną pomoc i życzliwe ustosunkowanie się do moich poczynań oraz licznym Kolegom i Słuchaczom moim za pomoc przy wydaniu i składaniu podręcznika.

Jeżeli podręcznikowi mojemu uda się, chociażby w małym stopniu, wypełnić dotychczasową lukę w dziedzinie elektrotechniki elementarnej - cel mój będę mógł uważać za osiągnięty.

A U T O R.

1) Część, traktująca o akumulatorach, stanowi streszczenie i wyjątki z tej pracy.

S P I S R Z E C Z Y.

Strona

PRZEDMOWA	1
PRZEDMOWA AUTORA	2

C Z Ę Ś Ć I.

POJĘCIA OGÓLNE.

<u>Rozdział 1. Określenia podstawowe.</u>	17
1. Budowa atomu	20
2. Pojęcie jednostki ładunku elektrycznego	21
3. Pojęcie S.E.M. i istota prądu elektrycznego	22
4. Ogólny podział ciał na przewodniki i izolatory	22
<u>Rozdział 2. Rodzaje prądu elektrycznego i skutki jego przepływu.</u>	
1. Rodzaje prądu elektrycznego	23
2. Skutki przepływu prądu elektrycznego	25
<u>Rozdział 3. Definicje jednostek.</u>	26
1. Amper	27
2. Amperogodzina	27
3. Siła elektromotoryczna	28
4. Potencjał	28
5. Różnica potencjałów	29
6. Pojęcie wolta	29
<u>Rozdział 4. Pojęcie oporności i prawo Ohma.</u>	
1. Pojęcie oporności	31
2. Jednostka oporności	31

3. Opór przewodnika	32
4. Zależność oporności od temperatury	33
5. Przewodność	34
6. Prawo Ohma	35

Rozdział 5. Prawa Kirchhoffa. Łączenie oporów.

1. Obwód otwarty i zamknięty	36
2. Opór wewnętrzny źródła	38
3. Napięcie i spadek napięcia	38
4. Drugie prawo Kirchhoffa	39
5. Szeregowe łączenie oporów	40
6. Uwzględnienie oporu wewnętrznego źródła	41
7. Równoległe łączenie oporów	42
8. Bocznik	45
9. Opór dodatkowy	46
10. Szeregowe połączenie oporów jednakowych	47
11. Rozkład prądu na oporach	48
12. Przewodność zastępcza	48
13. Mieszane połączenie oporów	49
14. Wyjaśnienie definicji oma międzynarodowego	50

Rozdział 6. Moc i praca prądu. Sprawność. Zamiana energii elektrycznej na energię cieplną.

1. Moc prądu	51
2. Praca prądu	53
3. Największa moc w obwodzie	54
4. Sprawność	55
5. Zamiana energii elektrycznej na ciepło	56

Rozdział 7. Mostek Wheatstone'a. Potencjometr.

1. Mostek Wheatstone'a	57
2. Opory zmienne	59

3. Potencjometr jednokierunkowy.....	59
4. Potencjometry dwukierunkowe.....	60
5. Budowa potencjometrów.....	63
<u>Rozdział 8. Lampy elektryczne.</u>	
1. Żarówki.....	64
2. Sprawność lamp.....	64
3. Lampy łukowe.....	65
4. Lampy neonowe.....	66
5. Komórka światłoczuła.....	66

C Z Ę Ś Ć II.

ELEKTROSTATYKA.

<u>Rozdział 1. Pojęcie linii sił pola elektrycznego. Wektory.</u>	
1. Przyciąganie się i odpychanie ładunków elektrycznych.....	68
2. Wektory.....	68
3. Linie sił pola elektrycznego.....	70
<u>Rozdział 2. Prawo Kulomba. Układ j. es. 1. Natężenie, strumień, gęstość linii sił w polu elektrycznym.</u>	
1. Ładunek elektryczny.....	73
2. Stała dielektryczna.....	74
3. Natężenie pola elektrycznego.....	75
4. Gęstość strumienia elektrycznego.....	75
5. Jednostka elektrostatyczna różnicy potencjałów.....	76
<u>Rozdział 3. Kondensatory.</u>	
1. Pojemność kondensatora.....	77
2. Jednostka pojemności.....	80
3. Stała dielektryczna.....	81

4. Wytrzymałość na przebicie	81
5. Rozłożenie się ładunków na powierzchni ciała	82
6. Napięcie i prąd ładowania i rozładowania	82
7. Moc i praca prądu ładowania	83
8. Równoległe łączenie kondensatorów	84
9. Szeregowe łączenie kondensatorów	85
10. Równoległe łączenie kondensatorów o jednakowej pojemności	86
11. Wytrzymałość układu na przebicie	87

Rozdział 4. Budowa kondensatorów.

1. Kondensatory zmienne	88
2. Kondensatory rurkowe	90
3. Kondensatory pudełkowe	91
4. Kondensatory elektrolityczne	91

Rozdział 5. Zasady elektrolizy.

1. Pojęcia podstawowe	91
2. Elektronowa teoria elektrolizy	93
3. Równoważnik elektrochemiczny ciał	94
4. Zasada galwanotechniki	94

Rozdział 6. Kondensatory elektrolityczne.

1. Budowa kondensatorów elektrolitycznych	94
2. Załączanie kondensatora elektrolitycznego w obwód	96

C Z Ę Ś Ć III.

OGNIWA PIERWOTNE I WTÓRNE.

Rozdział 1. Ogniwa pierwotne.

1. Zasada działania ogniwa	97
----------------------------------	----

2. Stos Volty	98
3. Rodzaje ogniw	99
4. Ogniwo typu Leclanché	100
5. Ogniwo Menotti-Daniella	102
6. Elektronowe uzasadnienie powstawania siły elektro- motorycznej w ogniwie	103
7. Pojemność ogniwa	104
8. Łączenie ogniw w baterie	104

Rozdział 2. Ogniwa wtórne czyli akumulatory.

1. Opis ogólny akumulatorów kwasowych	106
2. Budowa i zasada działania akumulatorów kwasowych	108
3. Formowanie płyt	109
4. Procesy elektrochemiczne przy ładowaniu i wyłado- waniu akumulatora	110
5. Gęstość elektrolitu	112
6. Reakcje poboczne	114
7. Siła elektromotoryczna	115
8. Opór wewnętrzny	115
9. Napięcie na zaciskach	116
10. Pojemność użyteczna	116
11. Ładowanie i rozładowanie akumulatora	118
12. Niedomagania akumulatorów	121
13. Akumulatory ługowe	121

C Z Ę Ś Ć IV.

MAGNETYZM.

Rozdział 1. Pojęcia podstawowe.

1. Magnesy naturalne	124
2. Masa magnetyczna	125

3. Prawo Kulomba	125
4. Przenikalność magnetyczna	126
5. Układ jednostek elektromagnetycznych /j.e.m./	126
6. Linie sił pola magnetycznego	127
7. Wypadkowe pole magnetyczne	129
8. Solenoid i zwojnica	130
9. Teoria cząsteczkowa Webera	133
<u>Rozdział 2. Pojęcia i jednostki. Zjawisko histerezy. Elektro-</u> <u>magnetyczny układ jednostek. Prawo Ohma dla obwodu</u> <u>magnetycznego.</u>	
1. Natężenie pola magnetycznego	134
2. Strumień i indukcja magnetyczna	134
3. Krzywa przenikalności	135
4. Krzywa histerezy	136
5. Wzajemna zależność wielkości jednostek praktycz- nych i elektromagnetycznych	139
6. Prawo Ohma dla obwodu magnetycznego	140

C Z Ę Ś Ć V.

INDUKCYJNOŚĆ.

Rozdział 1. Samoindukcja.

1. Strumieniozwoje	144
2. Zależność natężenia pola magnetycznego od kształtu przewodnika	145
3. Powstanie siły elektromotorycznej samoindukcji	146
4. Współczynnik samoindukcji	148
5. Wielkość siły przeciw elektromotorycznej samoindukcji	151

Rozdział 2. Indukcja wzajemna.

1. Zjawisko indukcji wzajemnej	152
--------------------------------------	-----

2. Współczynnik indukcyjności wzajemnej.....	153
3. Współczynnik sprzężenia.....	155
4. S.E.M. indukcji wzajemnej.....	156
5. Jednostki.....	157

Rozdział 3. Łączenie zwojnic. Wariometr. Bifilarność.

Typy zwojnic, spotykanych w praktyce.

1. Łączenie zwojnic.....	158
2. Wariometr.....	161
3. Bifilarność.....	164
4. Zamiana energii elektrycznej na magnetyczną.....	164
5. Typy zwojnic, spotykanych w praktyce.....	165

C Z Ę Ś Ć VI.

MASZYNY ELEKTRYCZNE.

Rozdział 1. Zasada działania maszyn elektrycznych.

1. Ruch przewodnika w polu magnetycznym.....	166
2. Reguła trzech palców prawej ręki /reguła Fleminga prawej ręki/.....	166
3. Wielkość indukującej się siły elektromotorycznej.....	167
4. Zasada działania silnika elektrycznego.....	169

Rozdział 2. Prądnicą prądu zmiennego.

1. Podział maszyn elektrycznych.....	171
2. Zasada działania prądnicy prądu zmiennego.....	172
3. Wartość indukującej się siły elektromotorycznej w prądnicy prądu zmiennego.....	174
4. Graficzna metoda przedstawienia siły elektromoto- rycznej zmiennej.....	176
5. Pojęcie okresu, częstotliwości i szybkości kąto- wej.....	178

6. Wartość chwilowa siły elektromotorycznej, prądu i napięcia zmiennego	179
7. Budowa prądnicy prądu zmiennego	180
8. Prądy wirowe /Foucault/	183
9. Prądnice o obracającej się magniesnicy	184
10. Prądnice typu induktorowego	184
11. Alternator Alexanderssona	186

Rozdział 3. Prądnica prądu stałego.

1. Budowa prądnicy prądu stałego	187
2. Konstrukcja twornika	189
3. Siła elektromotoryczna prądnicy prądu stałego	191
4. Reakcja twornika	192
5. Iskrzenie i szczotki	193
6. Rodzaje prądnic prądu stałego	194
7. Charakterystyka prądnicy obcowzbudnej	195
8. Charakterystyka prądnicy bocznikowej	196
9. Charakterystyka prądnicy szeregowej	198
10. Charakterystyka prądnic szeregowo-bocznikowych	198
11. Regulacja SEM w prądnicach prądu stałego	199
12. Praktyczne zastosowanie poszczególnych rodzajów prądnic	199
13. Sprawność prądnic	200

Rozdział 4. Silniki i przetwornice.

1. Ogólne zasady działania silników elektrycznych	201
2. Charakterystyka i praktyczne zastosowanie silników różnych typów	202
3. Rozruszniki	205
4. Regulacja szybkości obrotów	206

5. Obliczanie sprawności silników	207
6. Jednofazowy silnik synchroniczny prądu zmiennego	208
7. Przetwornice obrotowe	210
8. Przetwornica wahadłowa	211

C Z Ę Ś Ć VII.

PRĄDY ZMIENNE.

Rozdział 1. Wartość skuteczna prądu zmiennego. Prądy złożone.

1. Wartość skuteczna prądu zmiennego	212
2. Prądy złożone	214

Rozdział 2. Opory rzeczywiste i urojone w obwodzie prądu zmiennego.

1. Opór rzeczywisty w obwodzie prądu zmiennego	216
2. Pojemność w obwodzie prądu zmiennego	217
3. Szeregowe połączenie pojemności i oporu rzeczywistego w obwodzie prądu zmiennego	223
4. Indukcyjność w obwodzie prądu zmiennego	226
5. Szeregowe połączenie indukcyjności i oporu rzeczywistego w obwodzie prądu zmiennego	229
6. Szeregowe połączenie indukcyjności, pojemności i oporu rzeczywistego w obwodzie prądu zmiennego	231
7. Rezonans szeregowy czyli rezonans napięć	233
8. Równoległe połączenie pojemności i oporu rzeczywistego w obwodzie prądu zmiennego	244
9. Równoległe połączenie indukcyjności i oporu rzeczywistego w obwodzie prądu zmiennego	246

10. Rezonans równoległy czyli rezonans prądów.....	248
<u>Rozdział 3. Moc w obwodzie prądu zmiennego. Transformatory.</u>	
<u>Zjawisko naskórkowości. Ekranowanie.</u>	
1. Moc w obwodzie prądu zmiennego.....	259
2. Transformatory.....	262
3. Zjawisko naskórkowości.....	268
4. Ekranowanie.....	269

C Z E Ś Ć VIII.

PRZYRZĄDY POMIAROWE.

<u>Rozdział 1. Pomiary w elektrotechnice i ogólny podział przyrządów pomiarowych.</u>	
1. Rodzaje pomiarów.....	271
2. Podział przyrządów pomiarowych i ich ogólna charakterystyka.....	273
<u>Rozdział 2. Przyrządy do mierzenia natężenia prądu.</u>	
1. Podział ogólny.....	274
2. Zasadnicze typy galwanometrów.....	275
3. Najprostszy typ galwanometru elektromagnetycznego.....	275
4. Galwanometr tangensowy.....	277
5. Neutralizacja wpływu pola magnetycznego ziemskiego i dodatkowe sposoby zwiększenia czułości galwanometru.....	278
6. Galwanometr d'Arsonvala.....	279
7. Galwanometr ballistyczny.....	281
8. Boczniki.....	282

9. Amperomierze.....	283
10. Amperomierz cieplny.....	285
11. Amperomierze elektromagnetyczne /z ruchomym rdzeniem/.....	287
12. Amperomierz elektrodynamiczny.....	290
13. Prostowniki.....	293
14. Termopara.....	294
15. Tabelaryczne zestawienie cech charakterystycznych najpowszechniej używanych typów przyrządów pomiarowych.....	296
16. Dokładność amperomierzy.....	296

Rozdział 3. Pomiary napięć, spadków napięć i SEM.

1. Ogólny opis woltomierzy.....	298
2. Wskaźnik neonowy.....	299
3. Woltomierz elektrostatyczny.....	300
4. Pomiar SEM ogniw.....	301

Rozdział 4. Pomiary oporności, indukcyjności i pojemności.

1. Ogólne omówienie pomiarów oporności.....	304
2. Omierz w wielokrotnych przyrządach pomiarowych.....	304
3. Mostki do pomiarów oporności rzeczywistej.....	306
4. Mostek pocztowy.....	306
5. Mostki elektrodynamiczne.....	309
6. Pomiar oporności, indukcyjności i pojemności w obwodzie prądu zmiennego.....	312

Rozdział 5. Pomiar mocy, energii elektrycznej i czę-
stliwości.

1. Watomierz.....	316
2. Fazomierz.....	318
3. Liczniki elektryczne.....	320
4. Częstościomierze.....	322

DODATEK.

TABLICE FIZYCZNE I MATEMATYCZNE.

Tablica I. Budowa atomu.....	329
Tablica II. Pierwiastki chemiczne.....	330
Tablica III. Oporność właściwa niektórych ciał.....	340
Tablica IV. Stałe dielektryczne i wytrzymałość na przebiecie niektórych ciał.....	341
Tablica V. Równoważniki elektrochemiczne niektórych pierwiastków.....	342
Tablica VI. SEM i oporność wewnętrzna niektórych ogniw.....	343
Tablica VII. Przenikalność magnetyczna μ żelaza i stali.....	344
Tablica VIII. Zamiana ułamków zwyczajnych na dziesiętne.....	345
Tablica IX. Potęgi i pierwiastki liczby $\pi \cong 3,142$	346
Tablica X. Kwadraty i pierwiastki kwadratowe liczb całkowitych od 1 do 100.....	347
Tablica XI. Funkcje trygonometryczne.....	348
Bibliografia.....	350

ERRATA

Strona	W i e r s z		jest	powinno być
	od góry	od dołu		
17		6	6×10^{-23}	6×10^{23}
29	12		określenie	określenia
58		9	$R_1 = R_2$	$R_1 = R_3$
59		7	napięcie	różnica potencjałów
105	12		szreg	szereg
107	5		naładowani	naładowaniu
128		3	magnetycznego	magnetycznego
133	19/20		namagnesowanie	magnesowanie
137	1		nateżenie prądu pola	nateżenie pola
146		20	powstanie	powstawanie
244	7		piersze	pierwsze
257	5/6		Widzimy, kształt	Widzimy, że kształt
267		12	pierwtonego	pierwotnego
280		11	akuminiowych	aluminiowych
339	rubryka 2, poz. 89		Aktym	Aktyn

Autor zobowiązany będzie wszystkim Czytelnikom, którzy zechcą łaskawie przesłać swoje uwagi co do zauważonych błędów i usterek pod adresem: Polish Forces, P/95.

- 17 -

C z ę ść I.

P O J Ę C I A O G Ó L N E.

=====

R o z d z i a ł 1.

Określenia podstawowe.

Budowa atomu. Wszystko, co nas we wszechświecie otacza, możemy najogólniej podzielić na materię i energię. Zarówno materia, jak i energia nie są samistne - nie można sobie wyobrazić istnienia materii bez energii i energii bez materii. Budowa materii jest bardzo skomplikowana, mimo że wszystkie ciała zbudowane są z zaledwie 92 pierwiastków. Pierwiastkiem chemicznym nazywamy ciało, które się całkowicie składa z takich samych atomów. Atomem jest najdrobniejsza część ciała, która przez podział nie ztraca cech, właściwych całemu ciału. Wszystkie pierwiastki podzielić zatem możemy na atomy. Zarówno ciała proste, jak i ciała złożone, dzielą się na cząsteczki czyli molekuly. Cząsteczki ciał złożonych składają się z różnych atomów różnych pierwiastków. Każdy atom składa się z najdrobniejszych, znanych nam cząsteczek materii, które nazywamy elektronami i protonami. Elektrony i protony są bardzo małe. Mimo że proton jest około 1840 razy cięższy od elektronu, masa jego wynosi zaledwie $1,63 \times 10^{-24}$ grama. Wymiary całego atomu, zakładając, że kształt jego jest kulisty, wahają się w granicach od $2,4 \times 10^{-8}$ cm do 5×10^{-8} cm. Na gram jakiegokolwiek ciała składa się bardzo wielka ilość atomów /np. 1 g wodoru zawiera 6×10^{23} atomów/.

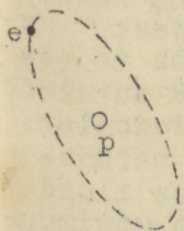
Ciała istnieją w trzech zasadniczych stanach: stałym, ciekłym i gazowym. Jeżeli przyjrzymy się bliżej budowie atomu, to okaże się, że jego układ wewnętrzny całkowicie przypomina układ planetarny słoneczny. Wszystkie protony atomów wchodzi w skład jądra atomowego wraz z częścią elektronów. Każdy proton przyciąga jeden

elektron, podczas gdy same protony i same elektrony wzajemnie odpychają się od siebie. Nieustannemu prawu ruchu w przyrodzie podlegają nie tylko elektrony wirujące, ale i atomy w pierwiastkach, a cząsteczki w pierwiastkach i ciałach złożonych. Od względnej szybkości ruchu cząsteczek zależy stan fizyczny danego ciała. Gdy ruch cząsteczek staje się powolniejszy, ciało się zestala. W miarę przyspieszenia ich ruchu ciało przechodzi w stan ciekły /czasami niespostrzeżenie/, a następnie w gazowy. Nas budowa atomów interesuje z tego względu, że proton i elektron są zarazem najmniejszymi znanymi nam ładunkami elektryczności.

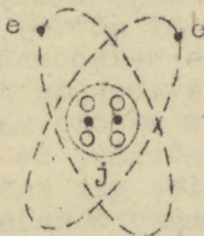
W każdym atomie mamy tyle protonów, co i elektronów, ale ilości elektronów i protonów, razem wzięwszy, są różne w atomach różnych pierwiastków. Rys. 1 przedstawia nam najprostszy atom - wodoru. Na rys. 2 mamy przedstawiony atom helu. W tablicy pierwiastków chemicznych mamy uszeregowane wszystkie istniejące pierwiastki wg tzw. liczby atomowej. Liczba ta odpowiada ilości elektronów wirujących w atomie danego pierwiastka. Inna cecha charakterystyczna atomu pierwiastka, a mianowicie masa atomowa, odpowiada mniej więcej ilości protonów w atomie, ponieważ masy elektronu, lżejszego od protonu 1840 razy, praktycznie nie bierzemy pod uwagę. Tak więc, mając daną masę atomową i liczbę atomową danego pierwiastka, możemy dokładnie obliczyć ilość protonów i elektronów w jądrze oraz elektronów wirujących.

Weźmy np. atom miedzi o liczbie atomowej 29 i masie atomowej 64 /rys. 7/. W jądrze atomu tego pierwiastka będziemy mieli 64 protony, a ponieważ w każdym atomie mamy tyle protonów, co i elektronów, ogółem w atomie będzie również 64 elektrony, z czego 29 będzie wirowało, a reszta, tj. $64 - 29 = 35$, będzie związana w jądrze atomowym.

Orbity elektronów wirujących w atomie nie są jednak rozrzucone chaotycznie w przestrzeni, a uszeregowane wg pewnych praw w niejako powłoki, stanowiące zwartą całość /rys. 6/. Pierwsza, najbliższa jądru atomowemu powłoka, zawiera dwie orbity, druga zawiera 8 orbit, trzecia - 8, czwarta - 18, piąta - 18 i szósta - 32. Jeżeli powłoki orbit elektronów wirujących w danym atomie są skompletowane, to bardzo trudno jest dodać



Rys.1.



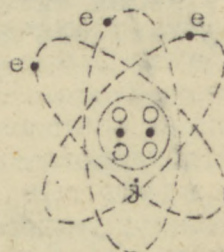
Rys.2.



Rys.3.



Rys.4.

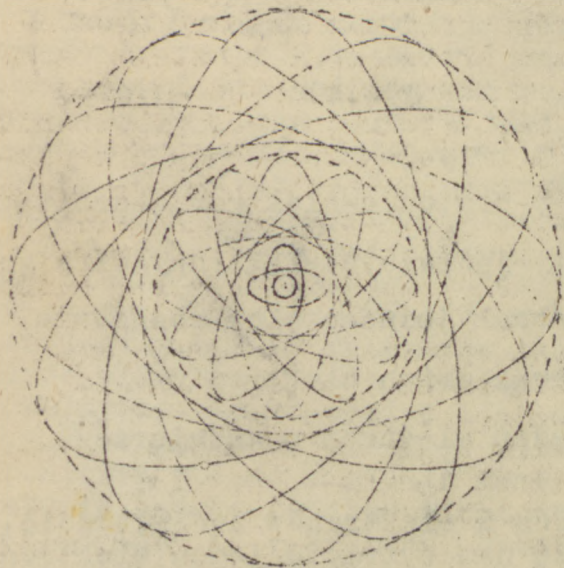


Rys.5.

- Rys.1.- Najprostszy atom - atom wodoru: p-proton, e-elektron, o-orbita.
Rys.2.- Elektrycznie obojętny atom helu: j-jądro; e, e-elektrony wirujące.
Rys.3.- Atom helu, naładowany dodatnio /brak jednego elektronu/.
Rys.4.- Atom helu, naładowany dodatnio /brak dwóch elektronów/.
Rys.5.- Atom helu, naładowany ujemnie /jeden elektron w nadmiarze/.

do takiego atomu jeden elektron, lub jeden z elektronów zeń wytrącić. Jeżeli natomiast z jakiegoś atomu uda się nam wytrącić jeden elektron, wtedy atom ten nie ma tylu elektronów, co i protonów, i jądro tego atomu, mając nadwyżkę jednego protonu, stara się przyciągnąć jeden elektron z najbliższego otoczenia. W ten sposób atom uwydatnia na zewnątrz siłę przyciągania i mówimy wtedy krótko, że atom został elektrycznie naładowany.

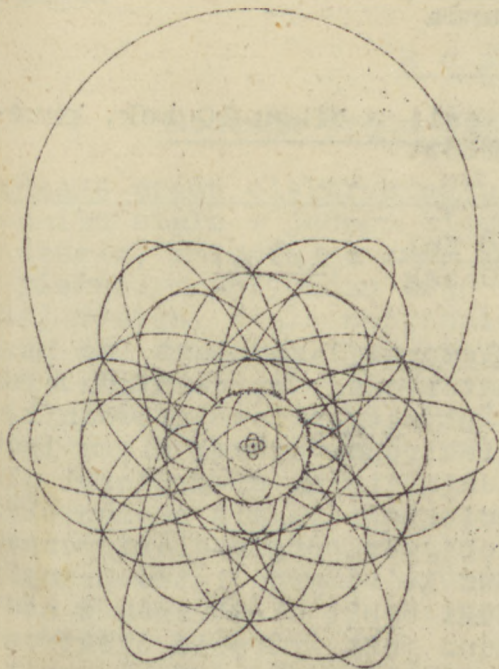
2. Pojęcie jednostki ładunku elektrycznego. Jeżeli w atomie znajdzie się jeden elektron w nadmiarze, to atom wykazuje wtedy pewną nadwyżkę "sił elektronowych". O takim atomie również mówimy, że jest elektrycznie naładowany. Oba te rodzaje naładowania są jednak zupełnie różne. Gdy w atomie mamy niedomiar elektronów, mówimy, że jest naładowany dodatnio, gdy zaś pewną ilość elektronów mamy w nadmiarze, mówimy, że atom został naładowany ujemnie.



Rys. 6. Trzy pierwsze powłoki orbit elektronów wirujących.

Oba te przypadki ilustrują nam rys. 3, 4 i 5. Ładunki elektryczne, z którymi spotykamy się w praktyce, są znacznie większe od ładunku, odpowiadającego jednemu elektronowi. Znikomość elektronu jako praktycznej jednostki miary ładunku można sobie uzmysłowić przez fakt, że promień elektronu jest wielkością rzędu 10^{-13} cm. Gdybyśmy chcieli ładunek elektryczny, spotykany w praktyce, mierzyć elektronami, to w wyniku otrzymalibyśmy astronomiczne cyfry, dlatego też wprowadzona została w praktyce jednostka, 1 Kulomba, która odpowiada $6,29 \times 10^{18}$ elektronów. Dopóki atom zawiera tyle protonów, co i elektronów, jest elektrycznie obojętny, dopiero przy nadmiarze lub niedomiarze elektronów mówimy, że atom został elektrycznie naładowany.

3. Pojęcie S.E.M. i istota prądu elektrycznego. Aby ten stan zaistniał, elektrony muszą przechodzić z jednych atomów do drugich. Taki ruch elektronów może nastąpić tylko pod wpływem jakiejś zewnętrznej siły, która pokona wewnątrzatomowe siły wzajemnego przyciągania. Siłę taką nazywamy siłą elektromotoryczną /S.E.M./, a ruch elektronów - prądem elektrycznym. Jeżeli weźmiemy jakiś przewodnik elektryczny, tj. ciało, przez które prąd elektryczny stosunkowo łatwo przepływa i będziemy badali przepływ prądu przez jakąś dowolną płaszczyznę przekroju tego przewodnika, to, jeżeli w jednostce czasu przepływnie przez ten przekrój mniejsza ilość elektronów, powiadamy, że natężenie prądu jest mniejsze, gdy zaś przez przekrój ten przepływnie większa ilość elektronów, powiadamy, że natężenie prądu jest większe. Natężenie prądu mierzy się zatem ilością ładunków, przepływających przez dany przekrój przewodnika w jednostce czasu. Oznaczając ilość ładunków symbolem Q , czas - symbolem t , a natężenie prądu - symbolem I , możemy to algebraicznie wyrazić przy pomocy wzoru:



Rys.7. Atom miedzi.

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

Jeżeli teraz w jednostce czasu, tj. w ciągu jednej sekundy przepływie przez dany przekrój przewodnika jeden Kulomb ładunku elektrycznego, to płynący przez przewodnik prąd będzie miał natężenie jednego ampera. Możemy zatem napisać, że

$$1 \text{ Amper} = \frac{1 \text{ Kulomb}}{1 \text{ sekunda}}$$

Przykład.

Obliczyć prąd, płynący w przewodniku, jeśli w ciągu 10 sek. przeniesiony zostanie przez ładunek 18 Kulombów.

Rozwiązanie.

$$I = \frac{Q}{t}; \text{ a zatem } I = \frac{18 \text{ Kul.}}{10 \text{ sek.}} = \underline{1,8 \text{ A.}}$$

4. Ogólny podział ciał na przewodniki i izolatory. Jasne jest, że im większa będzie zewnętrzna siła elektromotoryczna, wprawiająca elektrony w ruch, tym większy będzie prąd, płynący przez przewodnik. Nie we wszystkich jednak ciałach ruch elektronów odbywa się z taką łatwością i nie wszystkie ciała nadają się na przewodniki elektryczne. Te ciała, które bardziej przeciwstawiają się ruchom elektronów, czyli stawiają większy opór przepływowi prądu elektrycznego nazywamy izolatorami; te natomiast, przez które prąd łatwo przepływa, nazywamy przewodnikami. Jeżeli powłoki orbit elektronów w atomie są kompletne, to z danego atomu trudno jest wytrącić elektron i też go doń dodać. To też ciała, w których atomach powłoki orbit elektronów są kompletne, są izolatorami. Ogólnie wiadomy jest fakt, że miedź jest jednym z najlepszych przewodników prądu elektrycznego. Jeśli spojrzymy na rys. 7, na którym przedstawiona jest budowa atomu miedzi, zobaczymy, że ostatnia powłoka orbit elektronowych w tym atomie nie jest kompletna, a orbita jednego z elektronów szczególnie

jest oddalona od jądra. Siły wzajemnego przyciągania pomiędzy jądrem a tym elektronem są wskutek tego znacznie zmniejszone i elektron ten łatwo może być z atomu miedzi wytracony. Tak więc wyjaśnia się przyczyna, dla której miedź jest dobrym przewodnikiem prądu elektrycznego.

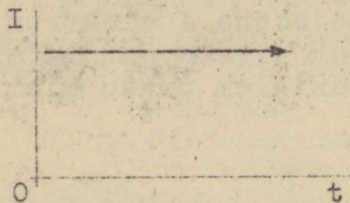
R o z d z i a ł 2.

Rodzaje prądu elektrycznego i skutki jego przepływu.

Rodzaje prądu elektrycznego. Prąd elektryczny może płynąć w przewodniku stale w jednym kierunku, lub naprzemian to w jednym, to w drugim, zmieniając swój kierunek w regularnych odstępach czasu. W pierwszym przypadku prąd ten może mieć wartość stałą, czyli, inaczej mówiąc, stałe natężenie /wykres na rys.8/, lub natężenie jego może się zmieniać, jak na wykresie na rys.9. Prąd, w którym natężenie i kierunek przepływu zmieniają się w czasie, przedstawiony jest na wykresie na rys.10. Prąd, przedstawiony na wykresie na rys.8, nazywamy prądem stałym, prąd, przedstawiony na wykresie na rys.9, nazywamy prądem pulsującym lub tętniącym, a prąd, przedstawiony na wykresie na rys.10, nazywamy prądem zmiennym. Prąd elektryczny możemy klasyfikować nie tylko pod względem natężenia i kierunku przepływu, ale i z punktu widzenia sposobu, w jaki elektrony są z miejsca na miejsce przenoszone. Pod tym względem prąd możemy podzielić na cztery rodzaje:

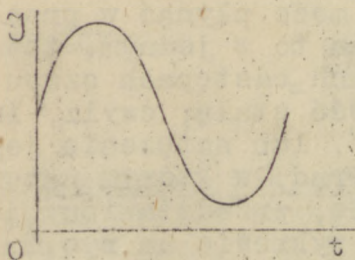
- 1/ prąd przewodzenia,
- 2/ prąd przesunięcia,
- 3/ prąd przeniesienia czyli konwekcyjny i
- 4/ prąd fikcyjny czyli prąd Maxwell'a.

Z prądem przewodzenia mamy do czynienia wtedy, gdy punkt,



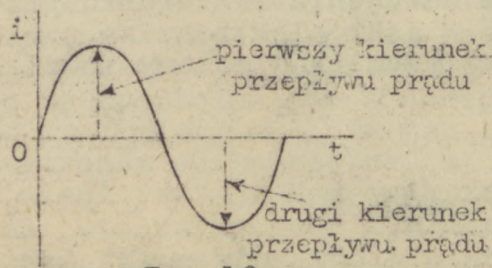
Rys.8.

Wykres prądu stałego.



Rys.9.

Wykres prądu pulsującego
czyli tętniącego.



Rys.10.

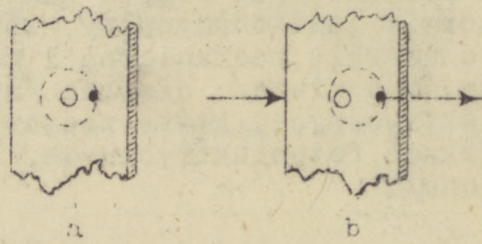
Wykres prądu zmiennego.

z którego prąd płynie, jest połączony przewodnikiem z punktem, do którego prąd płynie. Pod działaniem przyłożonej do przewodnika siły elektromotorycznej ruch elektronów po orbitach zamienia się wewnątrz przewodnika, na ruch, zgodny z kierunkiem przyłożonej siły elektromotorycznej, jak to zostało pokazane na rys.11 a i b. Jeżeli siła elektromotoryczna zostanie przyłożona do izolatora a nie do przewodnika, może się ona okazać zbyt małą na to, aby elektrony zostały ze swoich atomów wytrącone. Niemniej jednak pod jej wpływem orbity elektronów wirujących, a zatem i same elektrony, zostaną przesunięte w kierunku, zgodnym z kierunkiem jej działania. Ponieważ ruch elektronów, nawet nieznaczny, jest pewnego rodzaju prądem elektrycznym, zjawisko w tym wypadku zachodzące nazywamy prądem przesunięcia. Zilustrowane ono zostało na rys.12 a i b. Z prądem przeniesienia spotykamy się w zjawiskach elektrochemicznych, jakie zachodzą np. w zwykłym ogniwie. W takich wypadkach nie tylko elektrony, ale i atomy o pewnym ładunku elektrycznym przenoszą się z miejsca na miejsce, wywołując w ten sposób powstanie prądu elektrycznego, który nazywamy prądem przeniesienia czyli konwekcyjnym. Naładowany atom

nazywamy w takich wypadkach jonem. Jeżeli atom taki jest naładowany dodatnio, nazywamy go anionem, jeżeli zaś ujemnie - kationem. Proces, dzięki któremu atom zostaje naładowany, nazywamy procesem jonizacyjnym, lub, krótko mówiąc, jonizacją. Prąd fikcyjny czyli prąd Maxwell'a został nazwany prądem fikcyjnym dlatego, że właściwie ładunek przepływu prądu przy tym zjawisku nie zachodzi, przeniesiona zostaje tylko z miejsca na miejsce energia elektryczna przez promieniowanie. Ze zjawiskiem tym spotykamy się na każdym kroku w radiotechnice.



Rys.11. Prąd przewodzenia.



Rys.12. Prąd przesunięcia.

Skutki przepływu prądu elektrycznego. Gdy prąd elektryczny przepływa przez przewodnik, może wywołać szereg zjawisk, wynikających z zamiany energii elektrycznej na energię innego rodzaju. Tak więc prąd elektryczny może spowodować rozgrzanie się przewodnika, czyli zamianę energii elektrycznej na cieplną, co zachodzi w pierwszym lepszym grzejniku elektrycznym; może też spowodować rozszerzenie się tego przewodnika do białości, co pociąga za sobą zamianę energii elektrycznej na energię świetlną /np. w żarówce/. Przepływając przez jakiś płyn, który przewodzi prąd elektryczny, czyli przez elektrolit, może go rozłożyć

na składowe pierwiastki. Proces taki nazywamy elektrolizą. W ten sposób może np. zostać rozłożona woda na wodór i tlen. Mamy tu do czynienia z zamianą energii elektrycznej na energię chemiczną. Wokół przewodnika, przez który płynie prąd, powstaje pole magnetyczne, zachodzi tu więc zamiana energii elektrycznej na energię magnetyczną. Wreszcie każdemu chyba jest znane zjawisko, że naelektryzowana pałeczka szklana /przez potarcie czyli przez zabranie z niej pewnej ilości ci elektronów/ przyciąga drobne skrawki papieru, powodując ich ruch. W tym ostatnim wypadku mamy do czynienia z zamianą energii elektrycznej na mechaniczną. Proces zamiany energii elektrycznej na inne rodzaje energii jest odwracalny, tzn., że na energię elektryczną możemy zamiast energii mechaniczną i magnetyczną /np. w prądnicach/, chemiczną /np. w ogniwie/, ciepłą /np. w pewnego rodzaju urządzeniach termoelektrycznych, które zostaną jeszcze omówione/ i świetlną /np. w kómkach fotoelektrycznych, których działanie zostanie później wyjaśnione/.

R o z d z i a ł 3.

Definicje jednostek.

1. Amper. Ponieważ pomiar ładunku elektrycznego jest praktycznie trudny do przeprowadzenia, w nauce fizyki utarła się definicja ampera międzynarodowego, określona ze zjawiska elektrolizy. Pomiary elektrochemiczne są bowiem znacznie łatwiejsze do przeprowadzenia i o wiele bardziej dokładne. Tak więc określono, że prąd stały będzie miał natężenie jednego ampera wówczas, gdy, przepływając przez roztwór azotanu srebra, wyzwoli 0,001118 g. srebra w ciągu 1 sekundy. Czasami amper jest jednostką zbyt małą, używamy wówczas kiloampera /1 kA = 1000 A/. Gdy mamy do czynienia z prądami słabymi, tj. prądami o małym natężeniu

potrosujemy dla pomiarów miliampery /1 mA = 0,001 A/ i mikroampery
- 1 μ A = 0,000001 A/.

- amperogodzina. Mówiliśmy już przedtem o tym, że Kulomb jest jednostką
ładunku elektrycznego, czyli ilości elektryczności. Dla praktycznych
celem jednak celów, szczególnie, gdy mamy do czynienia z ogniwami, przyjęła
się większa jednostka ilości elektryczności, a mianowicie amperogo-
dzina. Ponieważ godzina ma 60sek. x 60 = 3600 sek., a $1A = \frac{1 \text{ Kulomb}}{1 \text{ sek.}}$, to
1 amperogodzina /1 Ah/ = 3600 sek. x $\frac{1 \text{ Kulomb}}{1 \text{ sek.}}$ = 3600 Kulombów.

Przykład.

Obliczyć ładunek elektryczny, otrzymany z ogniwa, wyładowanego prą-
dem 2A. w ciągu 10 godz.

Rozwiązanie.

Otrzymana ilość elektryczności w Ah:

$$2A. \times 10 \text{ godz.} = 20 \text{ Ah.}$$

Ładunek w Kulombach:

$$20 \text{ Ah.} \times 3600 = 72000 \text{ amperosekund czyli Kulombów.}$$

Siła elektromotoryczna. Mówiliśmy już przedtem również, że, aby
przewieść elektrony w ruch czyli spowodować przepływ prądu elektryczne-
go, potrzebna jest siła elektromotoryczna /S.E.M./. S.E.M. otrzymać
możemy bądź to na drodze procesu chemicznego /np. w ogniwie/, bądź
termoelektrycznego, gdy bowiem podgrzejemy miejsce połączenia dwóch
różnych przewodników, to na ich wolnych końcach wystąpi S.E.M. Prak-
tycznie zjawisko to wykorzystane jest w przyrządach pomiarowych na

prąd zmienny, które jeszcze zostaną dokładnie omówione. Najpopularniejszym i najpraktyczniejszym sposobem otrzymania S.E.M. jest jej wytwarzanie na drodze elektromagnetycznej. Sposób ten jest ogólnie stosowany we wszelkiego rodzaju prądnicach, tj. maszynach do wytwarzania S.E.M. Istnieje pozatem jeszcze jeden sposób, a mianowicie elektrostatyczny, który jednak z praktycznego punktu widzenia nie ma znaczenia. Elektrostatyczny sposób wytwarzania S.E.M. polega na stosowaniu maszyn elektrostatycznych /np. znanej nam z czasów szkolnych maszyny Wimshurst'a/, w których wykorzystane jest zjawisko ładowania elektrycznego przez tarcie. Mimo że w maszynach tego rodzaju możemy otrzymać S.E.M. - nie bardzo wielkie, to są one jednak krótkotrwałe i prąd, płynący pod ich wpływem przez przewodnik, jest również krótkotrwały. Z tego też względu maszynami tego typu interesować się bliżej nie będziemy.

4. Potencjał. Każde ciało naładowane, czy też elektrycznie obojętne, ma swój określony potencjał. Jeżeli ciało posiada normalną ilość elektronów, przypadającą na jeden atom, czyli nie jest naładowane żadnym ładunkiem, powiadamy, że ma potencjał zero, jeżeli natomiast ma nadmiar elektronów, określamy to mianem potencjału ujemnego, a niedomiar elektronów - mianem potencjału dodatniego. Ponieważ kula ziemiska zawiera przeogromną ilość elektronów i protonów, potencjał z jej przyjmujemy za zero. I rzeczywiście, w praktyce okazuje się, że u ciała, naładowane ujemnie i połączone z ziemią np. drutem miedzianym traci nadmiar elektronów, które odpływają do ziemi.
5. Różnica potencjałów. Jeżeli zetkniemy ze sobą dwa ciała, które mają ładunek elektryczny tej samej wielkości, nie zaobserwujemy żadnego przepływu elektronów. Jeżeli natomiast zetkniemy ze sobą dwa ciała o różnym ładunku elektrycznym, zobaczymy, że elektrony z ciała,

którym znajdują się w większym natężeniu w stosunku do normalnej ilości elektronów, przepłyną do ciała, w którym znajdują się w mniejszej nadwyżce w stosunku do normalnej ilości elektronów. Widzimy więc, że dla zjawiska przepływu prądu elektrycznego musi istnieć różnica między dwoma ciałami różnica potencjałów. Różnicę potencjałów i siłę elektromotoryczną mierzymy w tych samych jednostkach, bo siła elektromotoryczna warunkuje właśnie powstanie różnicy potencjałów, od której istnienia uzależniony jest przepływ prądu elektrycznego. Zarówno różnicę potencjałów, jak i siłę elektromotoryczną, mierzymy w jednostkach, zwanych voltami.

Pojęcie wolta. Aby zrozumieć, na jakich pojęciach opieramy definicję tej jednostki, musimy sobie powtórzyć pewne określenia z dziedziny fizyki ogólnej.

Każdy chyba wie, co oznacza pojęcie ruchu jednostajnego. Gdy jakieś ciało, np. samochód, porusza się stale z niezmienną szybkością 60 km. na godzinę, powiadaemy, że ruch taki jest ruchem jednostajnym. Istnieją poza tym inne, bardziej skomplikowane rodzaje ruchów, np. ruch jednostajnie przyspieszony. W ruchu tego rodzaju /np. przy spadaniu kamienia na ziemię/ z każdą sekundą przyrasta pewna szybkość; przyspieszenie ten nazywamy przyspieszeniem. Aby nadać jakiemuś ciału przyspieszenie, należy użyć pewnej siły, której wielkość mierzymy w dynach. Siła jest to siła, potrzebna dla nadania ciału o masie 1 g. przyspieszenia 1 cm./sek². Znaczący to, że, gdy jakieś ciało o masie 1 g. porusza się z szybkością jednostajną 1 cm./sek., to, po użyciu siły 1 dyny, ciało to będzie poruszało się w następnej sekundzie z szybkością 2 cm./sek., w 3-iej sekundzie z szybkością 3 cm./sek. itd. Przy pomocy dyny możemy określić pracę, jaką ta siła wykonuje. Pracę tę mierzy się w ergach. Erg oznacza pracę, dokonaną przez 1 dynę na drodze 1 cm. Jak jednak widzimy z powyższego, erg jest stosunkowo bardzo małą jednostką pracy, to też dla celów praktycznych używa się jednostki znacznie większej, a mianowicie dżoula, który się równa 10⁷ ergów.

Przeprowadzenie ładunku elektrycznego z jednego punktu do drugiego wymaga również dokonania pewnej pracy i możliwe jest tylko wtedy gdy pomiędzy tymi punktami istnieje różnica potencjałów. Jeżeli ta różnica potencjałów między dwoma punktami wynosi 1 Kulomb ładunku elektrycznego, który z jednego tych punktów możemy przeprowadzić do drugiego przez wykonanie pracy jednego dżoula, powiadamy, że różnica potencjałów pomiędzy tymi dwoma punktami wynosi 1 wolt.

Jak z definicji wynika, różnica potencjałów mierzy się stosunkiem włożonej pracy do ilości ładunku przeniesionego. Oznaczając różnicę potencjałów przez V , pracę, potrzebną na przeniesienie ładunku elektrycznego, przez W , a ładunek elektryczny - przez Q , możemy zatem napisać, że

$$V = \frac{W}{Q} .$$

Aby jednak pomiędzy dwoma punktami zaistniała różnica potencjałów, ładunek elektryczny nie musi zostać rzeczywiście przeniesiony. Wystarczy, że przy użyciu pewnej pracy moglibyśmy ten ładunek przenieść. Wielkość pracy potrzebnej, a nie bezpośrednio zużytej na przeniesienie danego ładunku, określa nam zatem różnicę potencjałów. W ten sposób różnicę potencjałów, a pośrednio i siłę elektromotoryczną, możemy więc porównać do energii potencjalnej, czyli energii w stanie statycznym. Gdy już prąd przez przewodnik płynie, energia potencjalna zostaje zamieniona na energię kinetyczną i zamiast terminu "siła elektromotoryczna" używamy określenia "napięcie". Napięcie jest zazwyczaj mniejsze od siły elektromotorycznej. Dokładna zależność wielkości napięcia od wielkości siły elektromotorycznej zostanie jeszcze szczegółowo omówiona.

W wypadkach, gdy mamy do czynienia z napięciami wyższego rzędu, używamy zamiast wolta większej jednostki pochodnej, a mianowicie - 1 kilowolta /1 kV = 1000 V/.

Tam, gdzie występują napięcia małe, do pomiarów używamy miliwolta /1 mV = 0,001 V/ lub mikrowolta /1 μ V = 0,00001 V/.

Przykład.

Obliczyć różnicę potencjałów pomiędzy dwoma punktami, warunkującą przeniesienie 5 Kulombów ładunku elektrycznego, jeżeli praca, potrzebna dla przeniesienia tego ładunku, wynosi 20 dżuli.

Rozwiązanie.

$$V = \frac{W}{Q} = \frac{20 \text{ dżuli}}{5 \text{ Kulombów}} = \underline{4 \text{ wolty.}}$$

R ó z d z i a ł 4.

Pojęcie oporności i prawo Ohma.

Pojęcie oporności. Jak już wiemy z poprzednich rozważań, niektóre ciała stawiają duży opór przepływowi prądu elektrycznego, inne znów - mały. To też, charakteryzując jakieś ciało z punktu widzenia elektrycznego, podajemy jego współczynnik oporności właściwej, czyli zdolność tego ciała do nieprzepuszczenia prądu elektrycznego. Każde ciało ma właściwą sobie oporność, którą możemy zmierzyć przez porównanie ze sobą różnych ciał. Możemy np. powiedzieć, że, jeśli miedź ma oporność wyrażoną jakąś oderwaną liczbą 1, to szkło ma oporność tyle a tyle razy większą od miedzi. Żeby jednak móc opór mierzyć bezwzględnie, tzn. nie przez porównywanie oporności poszczególnych ciał ze sobą, ustalona została jednostka oporności elektrycznej, zwana omem.

Jednostka oporności. Om jest oporem, jaki stawia przepływowi prądu elektrycznego słup rtęci o wysokości 106,3 cm. i o przekroju 1 mm² w temperaturze 0° C. Dla oporów większych używamy jednostki pochodnej 1 kΩ / 1 kiloom = 1000 Ω/, lub 1 MΩ / 1 megom = 1000000 Ω/. Przy

oporach małych stosuje się miliomy /1 mΩ = 0,001 Ω/ i mikroomy /1 μΩ = 0,000001 Ω/. Każde ciało ma właściwą sobie oporność. Oporność ta podawana jest w kontynentalnych tablicach oporności elektrycznej różnych ciał jako oporność przewodnika o długości 1 m. i przekroju 1 mm².

3. Opór przewodnika. W W. Brytanii oporność właściwa podawana jest w tablicach dla sześciu danego ciała o krawędzi 1 cm. Opór przewodnika zależy od oporności właściwej materiału, z jakiego przewodnik został zrobiony, od jego wymiarów i od jego temperatury. Im przewodnik jest dłuższy, tym opór jego jest większy, im zaś przekrój przewodnika jest większy, tym opór jego jest mniejszy. Przewodnik, przez który przepływa prąd, możemy porównać z rurą, przez którą przepływa strumień wody, i wtedy zależność oporu przewodnika od jego kształtu i rozmiarów stanie się zupełnie jasna. Nie biorąc zatem chwilowo pod uwagę zmian temperatury i oznaczając oporność właściwą przewodnika przez ρ , jego długość - przez l , a przekrój - przez s , możemy napisać, że opór przewodnika

$$R = \rho \cdot \frac{l}{s}$$

Aby wynik otrzymać w omach, to, przy użyciu tablic kontynentalnych, długość przewodnika musi być podana w metrach, a jego przekrój w milimetrach kwadratowych.

Przykład.

Obliczyć opór 250 m. okrągłego drutu miedzianego / $\rho = 0,017 \Omega$ z tablic kontynentalnych / o przekroju 4 mm².

Rozwiązanie. $R = \rho \cdot \frac{l}{s} = 0,017 \Omega \cdot \frac{250}{4} = \underline{\underline{1,0625 \Omega}}$

Zależność oporności od temperatury. Jeżeli przypomniamy sobie, że, w miarę wzrostu temperatury, wzrasta szybkość wirowania elektronów w atomie, a, co za tym idzie, i siły dośrodkowe, czyli wewnątrzatomowe siły wzajemnego przyciągania, to zrozumiemy, że elektron z atomu ciała o temperaturze wyższej od normalnej trudniej jest wytrącić i zmusić go do ruchu w kierunku, zgodnym z kierunkiem działania siły elektromotorycznej. Dlatego też w tablicach oporności właściwej ciał podawana jest zwykle temperatura, w jakiej pomiar został dokonany. Na kontynencie wynosi ona zazwyczaj 15° C, a w W. Brytanii - 20° C. W miarę wzrostu temperatury ciała wzrasta jego oporność właściwa, a więc i opór całkowity, zgodnie z wzorem

$$\rho_t = \rho_0 [1 + \alpha (t_t - t_0)],$$

gdzie ρ_t jest opornością właściwą w temperaturze t_t , ρ_0 jest współczynnikiem oporności właściwej w temperaturze, w jakiej zostały dokonane pomiary dla danej tabeli, α jest współczynnikiem cieplnym oporności na 1° C temperatury, a $t_t - t_0$ jest różnicą temperatur.

Dla przykładu podane są oporności właściwe niektórych ciał w temperaturze 20° C:

miedź	1,7	$\mu\Omega/\text{cm}^3$
platyna	11	"
rtęć	94	"
manganin	44,5	"
woda destylowana	7×10^{10}	"
mika	5×10^{16}	"

Współczynnik cieplny oporności / α / podany jest dla niektórych ciał w poniższej tabelce:

miedź	0,00393
żelazo i stal	0,006
manganin	0,000006

Ze względu na mały współczynnik cieplny oporności jeden ze stałów /patrz Tablica III/ nazywa się konstantanem /od łac. sta constans - stały/.

Współczynnik α dla węgla, szkła i elektrolitów jest ujemny, tzn. że, w miarę wzrostu temperatury, oporność właściwa tych ciał maleje.

Należy zaznaczyć, że przy użyciu powyższych /angielskich/ tabel długość i przekrój przewodnika we wzorze

$$R = \rho \cdot \frac{l}{s}$$

muszą być odpowiednio podane w cm. i cm^2 .

Przykład.

Opór przewodnika żelaznego w temp. 15°C wynosi 40Ω . Ile wyniesie opór tego przewodnika w temp. 50°C ?

Rozwiązanie.

$$R_t = R_0 [1 + \alpha (t_t - t_0)] = 40 [1 + 0,006(50 - 15)] = \underline{48,4 \Omega}.$$

5. Przewodność: Odwrotnością oporności jest przewodność, oznaczana literą G. Odpowiednio, odwrotnością oporności właściwej jest przewodność właściwa γ . Jak z samego pojęcia wynika,

$$G = \frac{1}{R}, \text{ a } \gamma = \frac{1}{\rho}.$$

Przewodność mierzy się w jednostkach, zwanych mho lub Siemensami, przyczym

$$1 \text{ Siemens} = 1 \text{ mho} = \frac{1}{\text{ohm}}.$$

Przykład.

Obliczyć przewodność 10 m okrągłego drutu manganinowego $\rho = 0,445 \Omega$ z tablic kontynentalnych/ o przekroju 1 mm^2 .

Rozwiązanie.

$$G = \frac{1}{R} = \frac{S}{\rho \cdot l} = \frac{1}{0,445 \times 10^1} = \underline{0,225 \text{ mho /Siemensów/}}$$

Prawo Ohma. Przy stałym oporze przewodnika, im większa siła elektromotoryczna zostanie przyłożona, tym większy prąd przezeń popłynie. Jeżeli wielkość siły elektromotorycznej będzie stała, a opór będzie się zwiększał, to prąd, płynący przez przewodnik, będzie malał. Widzimy stąd, że zależność pomiędzy siłą elektromotoryczną a prądem jest wprost proporcjonalna, a zależność pomiędzy oporem i prądem jest odwrotnie proporcjonalna. Matematycznie, operując znanymi nam już symbolami, możemy wyrazić to wzorem:

$$R = \frac{E}{I}$$

Wzór ten formułuje nam jedno z najważniejszych praw w nauce o elektryczności, a mianowicie - prawo O h m a.

Z prawa tego wynika m.inn., że, jeśli

$$R = \frac{E}{I}$$

to $G = \frac{1}{R} = \frac{I}{V}$, przewodność więc mierzyć możemy w amperach/Wolt.

Przykład.

Jaka S.E.M. musi być przyłożona do końców przewodnika o oporze 10 Ω , aby przezeń przepłynął prąd 3,5 A.?

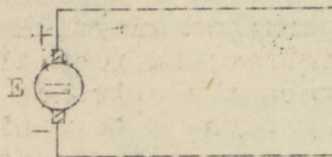
Rozwiązanie.

$$S.E.M. = I \cdot R = 3,5A \times 10 \Omega = \underline{35 V.}$$

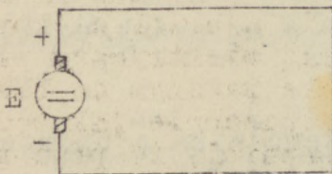
R o z d z i a ł 5.

Prawa Kirchhoffa. Łączenie oporów.

1. Obwód otwarty i zamknięty. Na rys. 13 mamy źródło siły elektromotorycznej E . Do obu jego końców, tj. do obu biegunów źródła, załączono są dwa przewodniki. Jest to źródło siły elektromotorycznej stałej,



Rys. 13. Obwód otwarty.



Rys. 14. Obwód zamknięty.

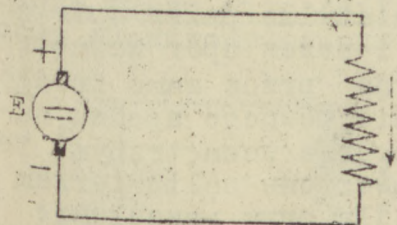
czyli, pod jej wpływem, popłynie w przewodnikach prąd stały. Wobec tego możemy oznaczyć stały biegun dodatni tego źródła przez +, a biegun ujemny przez -. Znak =, przez który zostało oznaczone samo źródło, oznacza źródło siły elektromotorycznej stałej, czyli, jak często popularnie, a błędnie mówimy, źródło prądu stałego. Prąd, który popłynie w tych przewodnikach, będzie jednak krótkotrwały, gdyż z jednego z końców możemy zabrać tylko ograniczoną ilość elektronów i tylko taką samą ilość elektronów możemy naładować drugi, wolny koniec. Prąd będzie płynął stale tylko wtedy, gdy oba wolne końce obu przewodników połączymy ze sobą. Taki układ podany mamy na rys. 14. W ten sposób utworzona została nieprzerwana droga dla przepływu prądu elektrycznego, droga, którą nazywamy obwodem zamkniętym. Prąd może w obwodzie płynąć stale tylko wówczas, gdy obwód elektryczny będzie zamknięty. W obwodzie, jak na rys. 13, prąd będzie płynął tylko przez bardzo krótki przeciąg czasu. Obwód taki, którego właściwie obwodem nazywać nie możemy, bo stanowi przerwana drogę dla

przepływu prądu, mimo wszystko opatrzony jest nazwą obwodu elektrycznego otwartego. W praktyce nigdy nie zamykamy obwodu elektrycznego bezpośrednio tylko samym przewodem, czyli, wyrażając to poprawnie, nie "zwieramy go".

Aby z prądu elektrycznego, który przepływa przez obwód, mieć jaką korzyść, zwykle łączymy w obwód jakiś odbiornik energii elektrycznej. Jakikolwiekby ten odbiornik nie był, żarówka, grzejnik, czy cośkolwiek innego, posiada on zawsze pewien opór. Dlatego też zawsze odbiornik energii elektrycznej przedstawiamy na rysunku symbolem opornika, tj. takim, jak na rys.15, na którym mamy odbiornik, włączony w obwód zamknięty.

Strzałka na tym rysunku oznacza kierunek przepływu prądu. Wiemy dobrze, że prąd elektryczny jest właściwie ruchem elektronów i że, wobec tego, elektrony płyną z tego bieguna źródła, na którym są w nadmiarze, do bieguna, na którym mamy niedomiar elektronów, tj.: od bieguna ujemnego do dodatniego.

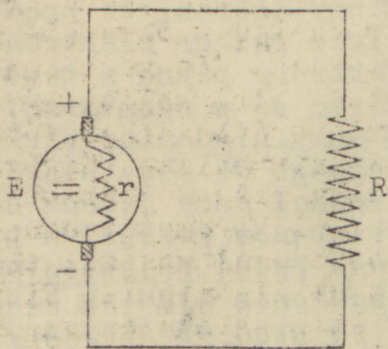
W nauce o elektryczności mamy jednak szereg praw, dotyczących kierunku przepływu prądu i ustalonych na długo przed pojawieniem się elektronowego uzasadnienia zjawisk elektrycznych. Rozumując, że prąd elektryczny płynie z bieguna o potencjale wyższym do bieguna o potencjale niższym, podobnie jak woda splywa z wyższego poziomu na niższy, orzeczone dawniej, że prąd płynie od bieguna dodatniego do ujemnego. Ta błędna nomenklatura została uświęcona tradycją i nicma podręcznika, któryby jej nie podtrzymał. Wprowadzenie rzeczywistego kierunku przepływu prądu nie zmieniłoby zresztą istoty rzeczy, bo zjawiska elektryczne zachodzą niezależnie od tego kierunku, a wprowadziłoby tylko zamieszanie w utartą



Rys.15. Opór w obwodzie zamkniętym. Strzałka oznacza kierunek przepływu prądu.

i przyjętą już terminologię. Dla podkreślenia różnicy pomiędzy rzeczywistym kierunkiem przepływu prądu a przyjętym, ten ostatni nazywa się konwencjonalnym kierunkiem przepływu prądu, lub mówi się krótko o "prądzie konwencjonalnym". W dalszych częściach niniejszej pracy za kierunek przepływu prądu przyjmować zatem będziemy kierunek przepływu prądu konwencjonalnego.

2. Opór wewnętrzny źródła. Każde źródło siły elektromotorycznej również posiada pewien opór, który nazywamy oporem wewnętrznym źródła i oznaczamy przez r . Dla odróżnienia, opór w samym obwodzie nazywamy oporem zewnętrznym i oznaczamy przez R /rys.16/.



Rys.16. Opór zewnętrzny i wewnętrzny.

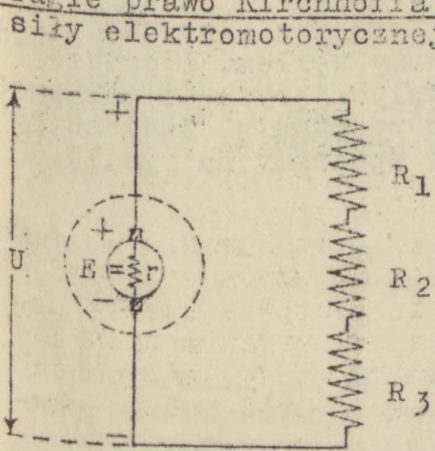
Siła elektromotoryczna, pochodząca ze źródła, powoduje przepływ prądu nie tylko przez opór zewnętrzny, ale i przez opór wewnętrzny. Prąd, przepływając przez samo źródło, powoduje powstanie pewnego spadku napięcia na jego oporze wewnętrznym. To też napięcie, zmierzone woltomierzem na zaciskach źródła przy przepływie prądu w obwodzie, jest zawsze mniejsze od właściwej siły elektromotorycznej źródła. Oczywiście jest, że spadek napięcia na oporze wewnętrznym źródła nastąpić może tylko wtedy, gdy obwód zostanie zamknięty i prąd będzie płynął w obwodzie.

3. Napięcie i spadek napięcia. Wartość, zmierzona woltomierzem na biegunach źródła, zamkniętego w obwód zamknięty, nazywamy - dla odróżnienia od właściwej siły elektromotorycznej - napięciem. Różnicę pomiędzy wartością siły elektromotorycznej źródła a wartością napięcia nazywamy spadkiem napięcia na oporze wewnętrznym źródła.

Z powyższych wywodów wynika wyraźnie, że napięcie jest mniejsze od siły elektromotorycznej o spadek napięcia na oporze wewnętrznym źródła. Jeśli chodzi o symbole, to siłę elektromotoryczną oznaczamy przez E , a napięcie - przez U .

W obwodzie możemy mieć nie jeden, a kilka oporów. W miarę przepływu prądu przez każdy z tych oporów potencjał będzie stopniowo malał, zmniejszając się skutkiem wykonania pewnej pracy przy przepychaniu ładunków elektrycznych przez każdy z oporów. Po przebyciu zatem przez prąd jakiegoś oporu, różnica potencjałów zmniejszy się o spadek napięcia na tym oporze /rys.17/.

Drugie prawo Kirchhoffa.



Rys.17. Szereg oporów, włączonych w obwód.

W obwodzie jednak mamy tylko jedno źródło siły elektromotorycznej, suma zatem spadków napięć w obwodzie nie może być od niej większa. Nie może ona też być mniejsza, bo wtedy otrzymalibyśmy na jednym tylko biegunie źródła jakąś różnicę potencjałów, co jest niemożliwe. Gdybyśmy mieli w obwodzie kilka sił elektromotorycznych, wypadkowa siła elektromotoryczna równałaby się sumie poszczególnych sił elektromotorycznych, ale z uwzględnieniem kierunku ich działania /pamiętać należy o tym, że suma dwóch sił, działających w kierunkach przeciwnych, jest ich różnicą/. Tak więc dochodzimy do tzn. drugiego prawa

Kirchhoffa, które brzmi: "Suma sił elektromotorycznych w obwodzie równa się sumie wszystkich spadków napięć w tym obwodzie!"

Prawo to jest uogólnieniem prawa Ohma.

Jeżeli przez jakiś opór R przepływa prąd I pod napięciem U , to, z prawa Ohma,

$$U = IR.$$

A więc spadek napięcia na oporze równa się iloczynowi prądu, przepływającego przez ten opór, przez sam opór. Jeżeli więc w obwodzie będziemy mieli opory: R_1, R_2 i R_3 , to /z drugiego prawa Kirchhoffa/
 $E_1 + E_2 + E_3 = U_1 + U_2 + U_3 = IR_1 + IR_2 + IR_3 = I/R_1 + R_2 + R_3/.$

Jak w ostatniej postaci równania widzimy, prąd, płynący przez wszystkie opory obwodu, a więc w całym obwodzie, jest taki sam.

5. Szeregowe łączenie oporów. Gdy połączymy ze sobą dwa /lub więcej/ 6 przewodniki, to miejsce ich połączenia nazywamy węzłem. Pierwsze prawo Kirchhoffa mówi nam, że suma prądów, wpływających do jakiegoś węzła, równa się sumie prądów, które z niego wypływają. Zastosujmy teraz w praktyce te teoretyczne rozważania i spójrzmy na rys.17. Z prawa Ohma całkowity opór tego obwodu

$$R_c = \frac{U}{I}.$$

Z drugiego prawa Kirchhoffa

$$U = I /R_1 + R_2 + R_3/.$$

A zatem

$$R_c = \frac{I /R_1 + R_2 + R_3/}{I},$$

skąd

$$R_c = R_1 + R_2 + R_3.$$

Jeżeli opory łączymy ze sobą tak, że koniec jednego oporu łączymy

z początkiem drugiego, koniec drugiego z początkiem trzeciego itd., to takie połączenie oporów ze sobą nazywamy połączeniem szeregowym. Słownie możemy wyrazić powyższy wzór, jak następuje: opór całkowity oporów, połączonych szeregowo, równa się sumie poszczególnych oporów.

Przykład.

Obliczyć opór zastępczy /całkowity/ dla układu szeregowego 3 oporów o wartościach: 272,8 Ω, 341,64 Ω i 385,56 Ω.

Rozwiązanie.

$$R_c = R_1 + R_2 + R_3 = 272,8 \Omega + 341,64 \Omega + 385,56 \Omega = 1000 \Omega = \underline{1k \Omega}.$$

6. Uwzględnienie oporu wewnętrznego źródła. Opór wewnętrzny źródła jest w stosunku do części obwodu na zewnątrz źródła /czyli w stosunku do tzw. obwodu zewnętrznego/ również połączony szeregowo. A zatem opór całkowity R_c obwodu, w którym znajduje się tylko jeden opór zewnętrzny R , wynosi

$$R_c = R + r,$$

gdzie r jest oporem wewnętrznym źródła. Prawo Ohma skorygować zatem należy, jak następuje:

$$I = \frac{E}{R_c} = \frac{E}{R+r}.$$

Ponieważ, jak wynika z poprzednich rozważań, napięcie równa się sile elektromotorycznej źródła, zmniejszonej o spadek napięcia na oporze wewnętrznym źródła, a spadek napięcia na oporze wewnętrznym źródła - to iloczyn prądu, przepływającego przez źródło, i oporu wewnętrznego; możemy więc napisać, że

$$U = E - Ir, \text{ skąd}$$

$$U + Ir = E, \text{ więc}$$

$$E - U = Ir, \text{ zatem}$$

$$I = \frac{E - U}{r}$$

gdzie I — to prąd, przepływający przez źródło, U — napięcie na zaciskach źródła, E — siła elektromotoryczna źródła, a r — jego opór wewnętrzny.

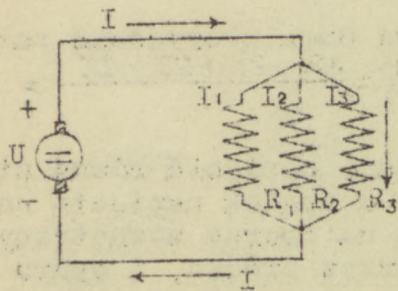
Przykład.

Obliczyć siłę elektromotoryczną /S.E.M./ źródła o napięciu na zaciskach 100 V i oporze wewnętrznym 5 Ω , wiedząc, że w obwodzie tego źródła płynie prąd o natężeniu 4 A.

Rozwiązanie.

$$E = U + Ir = 100 \text{ V} + 4 \times 5 \text{ V} = \underline{120 \text{ V}}.$$

7. Równoległe łączenie oporów. Połączenie oporów, jak na rys.18, nazywamy połączeniem równoległym. Pod wpływem napięcia U w obwodzie popłynie prąd I , który się rozgałęzi na oporach R_1 , R_2 i R_3 .



Rys.18. Równoległe połączenie oporów.

Zgodnie z pierwszym prawem Kirchhoffa,

$$I = I_1 + I_2 + I_3,$$

a spadki napięć na całej kombinacji oporów a więc i na każdym z oporów, będą równe napięciu źródła:

$$U = I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2 = I_3 \cdot R_3,$$

skąd

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2}; \quad I_3 = \frac{U}{R_3};$$

a zatem
$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} = U / \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) /,$$

stąd
$$\frac{I}{U} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} .$$

Ponieważ jednak, zgodnie z prawem Ohma, opór całkowity

$$R_c = \frac{U}{I} , \text{ to } \frac{1}{R_c} = \frac{I}{U} , \text{ więc}$$

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} .$$

Przykład.

Obliczyć opór całkowity układu równoległego 4 oporów o wartościach 2 Ω, 3 Ω, 4 Ω i 7 Ω.

Rozwiązanie.

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_c} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{7} = \frac{42 + 28 + 21 + 12}{84} = \\ &= \frac{103}{84} . \text{ Stąd } R_c = \frac{84}{103} = \underline{0,82 \Omega} . \end{aligned}$$

Gdy opory są sobie równe, tj. $R_1 = R_2 = R_3,$

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} = \frac{3}{R_1} .$$

Oznaczając 3 przez n /ilość jednakowych oporów, połączonych równolegle/:

$$\frac{1}{R_c} = \frac{n}{R}, \text{ skąd } R_c = \frac{R}{n},$$

gdzie R oznacza każdy z jednakowych oporów, połączonych równolegle.

Przykład.

Obliczyć opór całkowity układu równoległego 15 oporów po 45 Ω każdy.

Rozwiązanie.

$$R_c = \frac{R}{n} = \frac{45 \Omega}{15} = \underline{3 \Omega}.$$

W wypadku, gdy mamy do czynienia tylko z dwoma oporami, połączonymi równolegle, to

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Po sprowadzeniu do wspólnego mianownika

$$\frac{1}{R_c} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2}, \text{ skąd } R_c = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

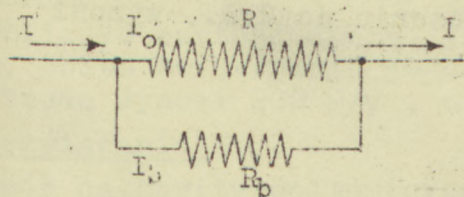
Przykład.

Obliczyć opór zastępczy dla 2 oporów, połączonych równolegle, o wartościach: 5 Ω i 20 Ω .

Rozwiązanie.

$$R_c = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{5 \times 20}{5 + 20} \Omega = \frac{100}{25} \Omega = \underline{4 \Omega}.$$

8. Bocznik. Czasami chodzi o przesunięcie przez dany opór / albo przez jakiś odbiornik energii elektrycznej, a często przez urządzenie pomiarowy / tylko części całkowitego prądu, płynącego w obwodzie. Załączamy wtedy równolegle do odbiornika mały opór w tym celu, aby większa część prądu przezeń przepłynęła. Opór taki nazywany bocznikiem / rys.19/. Prąd I , płynący w obwodzie, rozgałęzi się wówczas na dwa prądy: I_0 , płynący przez odbiornik o oporze R_0 i I_b płynący przez bocznik o oporze R_b .



Rys.19. Bocznik.

Z poprzednich wywodów wynika, że spadek napięcia na jednym oporze równa się spadkowi napięcia na oporze drugim, a zatem

$$I_0 \cdot R_0 = I_b \cdot R_b, \text{ skąd } R_b = \frac{I_0 \cdot R_0}{I_b}.$$

Jeżeli stawiamy warunek, aby tylko n - ta część prądu całkowitego I płynęła przez odbiornik o oporze R_0 , a zatem prąd o natężeniu $\frac{I}{n}$, wówczas reszta, a mianowicie $I - \frac{I}{n} = \frac{I(n-1)}{n}$, musi przepłynąć przez bocznik.

Podstawiając w poprzednim wzorze

$$I_0 = \frac{I}{n} \text{ i } I_b = \frac{I(n-1)}{n},$$

otrzymujemy

$$R_b = \frac{\frac{I}{n} \cdot R_0}{\frac{I(n-1)}{n}} = \frac{\frac{I \cdot R_0}{n}}{\frac{I(n-1)}{n}} = \frac{n \cdot I \cdot R_0}{n \cdot I(n-1)} = \frac{R_0}{n-1}.$$

Przykład.

Amperomierzem, służącym do mierzenia prądów o natężeniu do 2 A., mamy mierzyć prądy o natężeniu do 20 A. Obliczyć opór bocznikowy, wiedząc, że opór przyrządu wynosi $10 \Omega/A$.

Rozwiązanie.

Jeżeli opór przyrządu wynosi $10 \Omega/A$, to opór całkowity amperomierza, służącego do mierzenia prądów o natężeniu do 2 A., wynosi

$$2 \times 10 \Omega = 20 \Omega.$$

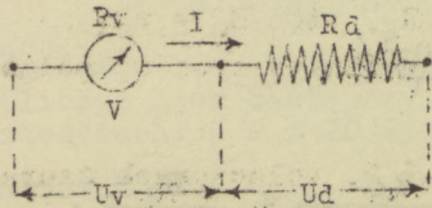
Zakres przyrządu chcemy zwiększyć

$$\frac{20 \text{ A.}}{2 \text{ A.}} = 10 \text{ razy.}$$

A zatem

$$R_b = \frac{R_A}{n - 1} = \frac{20 \Omega}{10 - 1} = \frac{20}{9} \Omega = \underline{2,222 \Omega}.$$

9. Opór dodatkowy. Operując woltomierzem, czyli przyrządem do mierzenia napięć, często stajemy wobec zagadnienia zwiększenia zakresu przyrządu. Przez zakres rozumiemy największe napięcie, jakie danym woltomierzem zmierzyć możemy. Jeżeli napięcie U_c , które chcemy zmierzyć, jest n razy większe od zakresu przyrządu, to, jeśli dopuszczalny spadek napięcia w przyrządzie wynosi U_v , a napięcie całkowite U_c , musimy szeregowo załączyć taki opór R_d , aby $U_c = U_v + U_d$ /rys.20/.



Rys.20. Opór dodatkowy.

Z założenia: $U_c = n \cdot U_v$, więc $nU_v = U_v + U_d$, skąd

$$U_d = nU_v - U_v = U_v / n - 1/.$$

Z prawa Ohma jednak

$$U_d = IR_d, \text{ a } U_v = IR_v. \text{ Stąd } IR_d = IR_v / n - 1/, \text{ więc } R_d = R_v / n - 1/.$$

Przykład.

Obliczyć wartość oporu, jaki należy połączyć szeregowo z woltomierzem, celem zwiększenia jego zakresu pięciokrotnie, wiedząc, że opór przyrządu wynosi $200 \Omega/V$, a dotychczasowy zakres - 10 V.

Rozwiązanie.

$$\text{Opór całkowity woltomierza } R_v = 10 \times 200 \Omega = 2000 \Omega.$$

$$R_d = R_v / n - 1/ = 2000 \Omega \cdot /5 - 1/ = \underline{8000 \Omega}.$$

0. Szeregowe połączenie oporów jednakowych. Tak jak obliczaliśmy opór całkowity obwodu, w którym mieliśmy kilka jednakowych oporów, połączonych równolegle, tak samo postępujemy w wypadku, gdy mamy do czynienia z kilkoma jednakowymi oporami, połączonymi szeregowo:

$$R_c = R_1 + R_2 + \dots + R_n,$$

$$\text{przy czym } R_1 = R_2 = \dots = R_n, \text{ więc } R_c = nR_1,$$

Gdzie R_1 jest wartością każdego z poszczególnych oporów, połączonych szeregowo.

Przykład.

Obliczyć opór całkowity 20 oporów po 5Ω , połączonych szeregowo.

Rozwiązanie.

$$R_c = nR_1 = 20 \times 5 \Omega = \underline{100 \Omega}.$$

11. Rozkład prądu na oporach. Z poprzednich wywodów wynika wyraźnie, że, w wypadku szeregowego połączenia oporów, prąd w obwodzie płynie przez wszystkie opory taki sam, a spadek napięcia $/U = IR /$, zgodnie z prawem Ohma, jest wprost proporcjonalny do wartości każdego z oporów. Przy równoległym połączeniu oporów spadki napięć na całej gałęzi równolegle połączonych oporów i na każdym z oporów są sobie równe, prąd całkowity natomiast rozdziela się na szereg prądów składowych i to, zgodnie z prawem Ohma $/I = U/R /$, odwrotnie proporcjonalnie do wartości każdego z oporów, połączonych równolegle.

12. Przewodność zastępcza. Biorąc pod uwagę nie oporność, a przewodność układu, możemy wzór

$$G = \frac{1}{R}$$

podstawić do otrzymanych już poprzednio rezultatów. Wówczas, dla połączenia równoległego oporów:

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n},$$

a zatem

$$G_c = G_1 + G_2 + \dots + G_n.$$

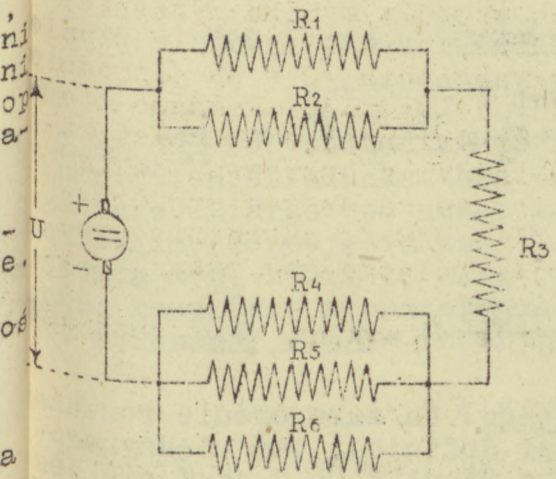
Dla szeregowego połączenia oporów:

$$R_c = R_1 + R_2 + \dots + R_n,$$

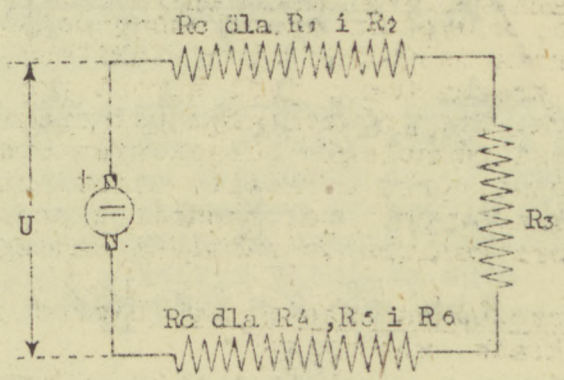
skąd

$$\frac{1}{G_c} = \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} + \dots + \frac{1}{G_n}.$$

Wzory na przewodność całkowitą obwodu są więc odwrócone, co zresztą wynika z samej jej definicji.



Rys. 21. Kombinowane połączenie oporów.



Rys. 22. Uproszczenie obwodu z rys. 21.

Mieszane połączenie oporów. Gdy mamy obwód, w którym część oporów połączona jest szeregowo, a część równoległe /jak na rys. 21/, dla obliczenia oporu całkowitego obwodu zawsze najpierw obliczamy opór całkowity gałęzi równoległych i doprowadzamy obwód do postaci, jak na rys. 22, gdzie opór całkowity bez żadnych już trudności da się obliczyć.

Przykład.

Obliczyć opór całkowity układu z rys. 21 przy następujących wartościach poszczególnych oporów: $R_1 = 5 \Omega$, $R_2 = 10 \Omega$, $R_3 = 3 \Omega$, $R_4 = 2 \Omega$, $R_5 = 4 \Omega$ i $R_6 = 6 \Omega$.

Rozwiązanie.

$$R_{1,2} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{5 \times 10}{5 + 10} \Omega = \frac{50}{15} \Omega.$$

$$\frac{1}{R_{4,5,6}} = \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{6} = \frac{6+3+2}{12} = \frac{11}{12}.$$

Stąd $R_{4,5,6} = \frac{12}{11} \Omega.$

$$R_c = \frac{50}{15} \Omega + 3 \Omega + \frac{12}{11} \Omega = 3 \Omega + \frac{550+180}{165} \Omega = \underline{7,424 \Omega}.$$

14. Wyjaśnienie definicji oma międzynarodowego. Na zakończenie rozważań na temat oporów należy zaznaczyć, że przy definicji oma międzynarodowego /elektrolitycznej/ wysokość słupa rtęci /106,3 cm./ nie jest przypadkowa. Jak bowiem wynika z prawa Ohma,

$$R = \frac{U}{I},$$

gdy więc przez obwód elektryczny zamknięty popłynie pod napięciem 1 wolta prąd o natężeniu 1 ampera, to taki obwód ma opór 1 oma. Okazało się przy badaniach laboratoryjnych, że opór taki dokładnie odpowiada oporowi słupa rtęci o wysokości właśnie 106,3 cm. i przekroju 1 mm², w temperaturze 0° C.

Moc i praca prądu. Sprawność. Zamiana energii elektrycznej na energię cieplną.

Moc prądu. Dotychczas rozpatrywaliśmy zagadnienie pracy, zużytej na przeniesienie ładunku, bez uwzględnienia czasu, w jakim praca ta była wykonana. Biorąc pod uwagę czas, potrzebny na wykonanie danej pracy, dochodzimy do pojęcia mocy. Z dwóch dowolnych maszyn ta będzie miała większą moc, która tę samą pracę wykona w krótszym czasie. Przez moc zatem rozumiemy stosunek pracy do czasu, w którym praca ta może być wykonana, a więc możemy napisać, że moc P :

$$P = \frac{W}{t}.$$

Z wzoru

$$V = \frac{W}{Q} \text{ /definicja różnicy potencjałów/}$$

/Praca/ $W = VQ.$

A więc

$$P = \frac{VQ}{t} = V \cdot \frac{Q}{t};$$

Stosunek $\frac{Q}{t}$ jest jednak znanym nam już pojęciem, stosunek bowiem ładunku do czasu, w którym zostanie on przeniesiony, określiliśmy już poprzednio mianem natężenia prądu. A zatem

$$P = VI.$$

A więc w obwodzie, w którym przepływa prąd elektryczny, moc wyrażać się będzie iloczynem prądu i różnicy potencjałów, czyli, praktycznie rzecz biorąc, iloczynem prądu i napięcia lub spadku napięcia.

Jeżeli przez przewodnik pod napięciem jednego wolta płynie prąd jednego ampera, to mówimy, że moc wynosi wtedy jeden wat. Moc zatem mierzymy w watach, przyczym

$$1 \text{ wat} = 1 \text{ wolt} \times 1 \text{ amper.}$$

Przykład.

Obliczyć moc prądu w obwodzie, w którym płynie prąd 3 A. pod napięciem 220 V.

Rozwiązanie.

$$P = U \cdot I = 220 \text{ V.} \times 3 \text{ A.} = \underline{660 \text{ watów.}}$$

Jeżeli $P = UI$, a z prawa Ohma

$$U = IR,$$

to przez podstawienie otrzymujemy

$$P = I^2 R.$$

Podobnie, z prawa Ohma,

$$I = \frac{U}{R}, \text{ skąd } P = \frac{U^2}{R}.$$

W tych ostatnich dwóch wzorach moc otrzymamy w watach, jeśli I, względnie U, będzie wyrażone w amperach, względnie w woltach, a R - w omach.

Tam, gdzie w grę wchodzi większe moce, mierzymy je w jednostkach pochodnych większych, a mianowicie w kW /kilowatach/, przyczym 1 kW = 1000 W.

Przykład.

Obliczyć moc na oporze 400 Ω , włączonym w sieć prądu stałego o napięciu 220 V.

Rozwiązanie.

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{220^2}{400} \text{ W.} = \frac{48400}{400} \text{ W.} = \underline{121 \text{ watów.}}$$

Przykład.

Obliczyć prąd, przepływający przez opór 100 Ω , jeżeli moc, wytworzona tym oporze, wynosi 2,5 kW.

Rozwiązanie.

$$P = I^2 \cdot R; \text{ stąd } I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{2500}{100}} = \sqrt{25} = \underline{5 \text{ A.}}$$

Popularną jednostką mocy w mechanice jest Kon mechaniczny /KM/. Po-
eważ w praktyce często spotykamy się z zamianą energii elektrycznej
mechaniczną i odwrotnie, należy zaznaczyć, że

$$1 \text{ kW} = 1,36 \text{ KM},$$

$$1 \text{ KM} = 736 \text{ watów.}$$

Przykład.

Jaka jest moc w KM prądnicy, w której napięcie na zaciskach
= 250 V., a maksymalny prąd, $I_{\text{max}} = 50 \text{ A.}$?

Rozwiązanie.

$$P = U \cdot I_{\text{max}} = 250 \text{ V.} \times 50 \text{ A.} = 12500 \text{ W} = \frac{12500}{736} \text{ KM} = \underline{17 \text{ KM.}}$$

Praca prądu. Przepływając przez przewodnik, prąd wykonuje pewną pra-
cę. Ponieważ

$$W = VQ,$$

a z wzoru

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

$$Q = It,$$

możemy przez podstawienie otrzymać.

$$W = Vit.$$

Jeżeli we wzorze $W = VQ$, Q wyrazimy w Kulombach, a V w woltach, to
acę W otrzymamy w dżulach. Praktyczną jednostką pracy prądu jest

jednak nie dżaul /jest to bowiem jednostka zbyt mała/, a watgodzina
/Wh/.

Z wzoru

$$W = VI t,$$
$$\frac{W}{t} = VI = P.$$

Widzimy więc, że moc wyniesie 1 wat, gdy w obwodzie zostanie wykona
na praca 1 dżaula w ciągu 1 sekundy. Stąd dżaul = wat x sekunda.
A zatem

$$\text{Watgodzina /Wh/} = 3600 \text{ dżauli.}$$

Pochodną, większą jednostką pracy prądu elektrycznego, jest Kilo-
watgodzina /1 kWh = 1000 Wh, więc 1 kWh = 3.600.000 dżauli/.

Płacąc elektrowni "za prąd", jak to popularnie mówimy, nie płacimy
ani za prąd, ani też za moc, a właśnie za pracę, jaką ten prąd wykona
nywa, dlatego też wszystkie liczniki elektryczne cechowane są w kWh.

Przykład.

Obliczyć zużycie energii elektrycznej przez grzejnik o oporze
100 Ω , włączony do sieci prądu stałego o napięciu $U = 220 \text{ V}$. na
przeciąg 5 godzin.

Rozwiązanie.

$$W = Pt = \frac{U^2}{R} \cdot t = \left(\frac{220^2}{100} \cdot 5 \right) \text{Wh} = \underline{242 \text{ Wh.}}$$

3. Największa moc w obwodzie. W tych wszystkich rozważaniach narzuca
się jednak pytanie, kiedy ta moc będzie największa, tj. kiedy będą
my mogli przy pomocy prądu, płynącego w obwodzie, wykonać możliwie
największą pracę. Zagadnienie to sformułować też możemy nieco in-
aczej: jaki odbiornik /o jakim oporze/ energii elektrycznej należy
łączyć w obwód zewnętrzny, aby moc była największa?

Odpowiedź na to znajdziemy, porównując wielkość oporu zewnętrznego

z wielkością oporu wewnętrznego źródła. Gdybyśmy załączyli w obwód opór większy od oporu wewnętrznego źródła, byłby on tak duży, że redukowałby wielkość prądu, płynącego w obwodzie, zmalałaby zatem znacznie i moc $P = UI$. Gdybyśmy natomiast załączyli opór mniejszy od oporu wewnętrznego źródła, napięcie znów zmalałoby znacznie, a co za tym idzie, i moc $P = UI$.

Moc największą $/P_{\max}/$ będziemy mieli w obwodzie wtedy, gdy napięcie będzie optymalne $/\text{najlepsze}/$ i prąd będzie optymalny. Z wzoru $P = UI$ widzimy, że

$$\text{gdy } U = \infty / \text{max} / , I = 0 ,$$

$$\text{gdy zaś } I = \infty / \text{max} / , U = 0 ,$$

więc istnieć musi stan pośredni, dla którego moc będzie w obwodzie największa. Zachodzi to dla

$$P_{\max} = \frac{U_{\max}}{2} \cdot \frac{I_{\max}}{2} = \frac{U_{\max} \cdot I_{\max}}{4} .$$

Stwierdzenie tego faktu doprowadza nas do jednej z najważniejszych zasad: aby otrzymać jaknajwiększą moc w obwodzie, opór zewnętrzny musi się równać oporowi wewnętrznemu źródła. Zasada ta doprowadza nas do konieczności tzw. "dopasowywania" oporu zewnętrznego do oporu wewnętrznego źródła celem otrzymania możliwie największej mocy na oporze zewnętrznym.

Sprawność. Mówiąc o mocy i pracy prądu elektrycznego, nie możemy pominąć zagadnienia sprawności. Przez sprawność rozumiemy stosunek mocy, jaką otrzymujemy z jakiegoś urządzenia $/\text{np. maszyny}/$, do mocy, jaką zużywamy na jego uruchomienie. Oznaczając sprawność grecką literą η

/eta/, możemy wyrazić to formułą:

$$\eta = \frac{\text{moc otrzymana}}{\text{moc zużyta}}$$

W każdym urządzeniu będziemy mieli pewne straty energii /na tarcie ciepło itp./, a zatem zawsze $\eta < 1$. Chcąc wyrazić sprawność procentowo, musimy pomnożyć otrzymany wynik przez 100. A zatem

$$\eta \text{ /w procentach/} = \frac{\text{moc otrzymana}}{\text{moc zużyta}} \times 100.$$

Sprawność obliczać czasem możemy również przez porównanie pracy włożonej do pracy otrzymanej, co nam wyniku nie zmieni.

Przykład.

Obliczyć sprawność prądnicy, wiedząc, że moc silnika napędzającego wynosi 150 KM, a moc prądnicy 45 KW.

Rozwiązanie.

$$45 \text{ KW} = 45 \times 1,36 \text{ KM} = 61,2 \text{ KM}.$$

$$\eta = \frac{61,2}{150} = 0,408.$$

$$\text{Procentowo } \eta = 0,408 \times 100 = \underline{40,8\%}.$$

5. Zamiana energii elektrycznej na ciepło. Pracę prądu elektrycznego, płynącego w obwodzie, możemy wykorzystać np. na ogrzanie przewodnika. Badania wykazały, że dla wytworzenia jednej małej kalorii /ciepło, potrzebne dla ogrzania 1 g. wody o 1°C/ potrzeba około 4,27 dżoula /tj. watsekund/. Jeżeli ilość ciepła, jaka powstanie przez zamianę $I^2 \cdot Rt$ watsekund energii elektrycznej oznaczymy przez Q , to, aby

Wyrazić Q w kaloriach małych, musimy I^2Rt podzielić przez 4,27.

$$A \text{ więc ilość ciepła /w kaloriach małych/ } Q = \frac{I^2Rt}{4,27} = \frac{1}{4,27} I^2Rt \approx$$

0,24 I^2Rt .

R o z d z i a ł 7.

Mostek Wheatstone'a. Potencjometr.

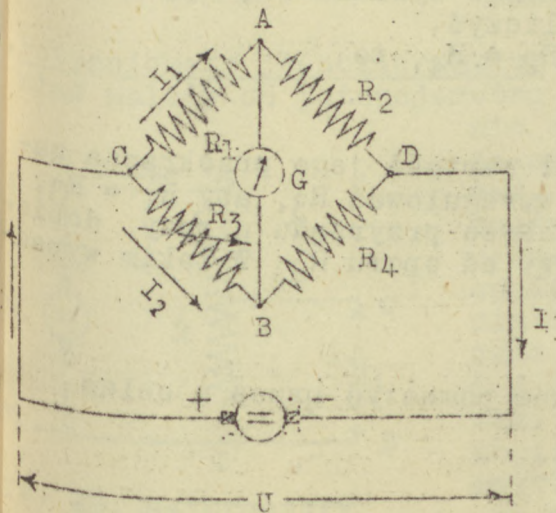
Mostek Wheatstone'a. Mostek Wheatstone'a służy nam do mierzenia oporów. Jak widzimy z rys. 23, składa się on ze źródła siły elektromotorycznej, dającej napięcie U na zaciskach, a więc i pomiędzy punktami C i D, z czterech oporów R_1 , R_2 , R_3 i R_4 i z galvanometru, czyli przyrządu, wykazującego nam przepływ prądu.

Prąd I , płynący w obwodzie, rozgałęzi się. Przez opory R_1 i R_2 przepłynie jakiś prąd I_1 , a przez opory R_3 i R_4 - prąd I_2 .

Z prawa Kirchhoffa

$$I = I_1 + I_2.$$

Opór R_3 jest oporem zmiennym, regulowanym /jak na rys.24/, to też wartość jego tak możemy dobrać, że przez galvanometr nie będzie płynął żaden prąd. Znajdzie to tylko w tym wypadku, gdy pomiędzy punktami A i B nie będzie różnicy potencjałów.



Rys. 23. Mostek Wheatstone'a.

Wtedy, z prawa Ohma,

$$I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_3.$$

Spadek napięcia pomiędzy punktami C i D równa się U.

A zatem spadek napięcia pomiędzy punktami A i D = $I_1 R_2 = U - I_1 R_1$,

a spadek napięcia pomiędzy punktami B i D = $I_2 R_4 = U - I_2 R_3$.

Ponieważ jednak

$$I_1 R_1 = I_2 R_3, \text{ więc } I_1 R_2 = I_2 R_4.$$

Dzieląc przez siebie stronami oba te równania, otrzymujemy:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}, \text{ skąd } R_1 = R_3 \cdot \frac{R_2}{R_4}.$$

Jeżeli R_1 jest oporem nieznanym, to, mając wyskalowaną regulację oporu R_3 , zawsze wartość jego możemy obliczyć.

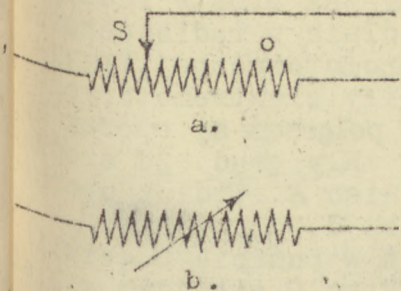
Gdy opory R_4 i R_2 dobierzemy tak, że $R_2 = R_4$, to

opór nieznaną $R_1 = R_3$.

Jeżeli nieznaną opór R_1 jest za duży i wartość jego przekracza zakres przyrządu / tzn. że nie możemy tak wyregulować R_3 , aby $R_1 = R_3$, bo $R_1 > R_3$ /, wtedy powiększyć możemy zakres przyrządu n razy, dobierając opór R_4 tak, aby był n razy większy od oporu R_2 . W takim wypadku

$$R_1 = R_2 \frac{n \cdot R_3}{R_4},$$

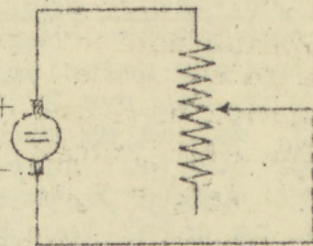
przyczym odczyt na skali przyrządu trzeba pomnożyć przez n celem otrzymania właściwego wyniku.



Rys. 24. Opory zmienne /regulowane/

2. Opory zmienne. Na rys. 24 a i b mamy podane symbole graficzne oporów zmiennych, regulowanych. Rys. 24 a odpowiada całkowicie rzeczywistemu układowi.

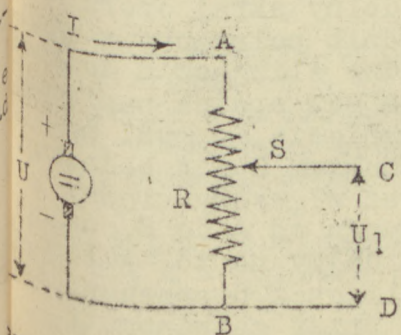
S na tym rysunku oznacza ślizgacz, a o - opornik. Załączenie takiego opornika w obwód ilustruje nam rys. 25.



Rys. 25. Opór regulowany, włączony w obwód.

Potencjometr jednokierunkowy. Tego rodzaju opornik regulowany odróżniać należy od potencjometru lub potencjometri. Jest to przyrząd,

nie służący do mierzenia potencjału, jakby to mylnie z nazwy jego można było wywnioskować, ale do ciągłej regulacji napięcia w części obwodu. Schemat najprostszego potencjometru podany jest na rys. 26. Na oporze R spadek napięcia = $U = IR$. W miarę przesuwania ślizgacza od punktu A do B możemy zmniejszać różnicę potencjałów pomiędzy punktami C i D / U_1 / w granicach $0 \ll U_1 \ll U$. Potencjometr pozwala nam więc na ciągłą regulację napięcia. Nie należy jednak mylić potencjometru ze zwykłym oporem regulowanym, włączonym w obwód szeregowo, podczas gdy potencjometr zawsze włączony jest równoległe.



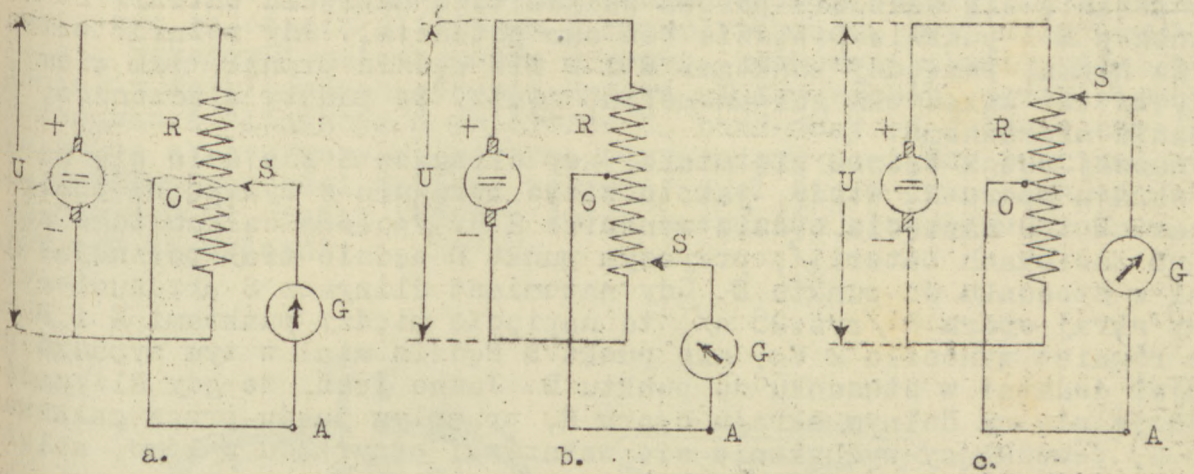
Rys. 26. Najprostszy potencjometr.

4. Potencjometry dwukierunkowe. Niezawsze spotykamy tak prosty rodzaj potencjometru. Bardzo często chodzi nam, szczególnie w radiotechnice o to, aby zmienić kierunek działania siły elektromotorycznej. Przyjrzyjmy się rys.27. Na rysunku tym mamy źródło siły elektromotorycznej, dające na zaciskach napięcie U . Bieguny jego połączone są oporem R . Opór ten jest duży, aby prąd płynął możliwie mały. Ze środkowego punktu O opornika R wyprowadzony został koniec A . Wzdłuż opornika, na całej jego długości, przesuwamy się ślizgacz S .

Na rys.27 a ślizgacz ten znajduje się również w punkcie O . Jeżeli założymy, że napięcie $U = 6 \text{ V.}$, to pomiędzy punktem O a każdym z biegunów będziemy mieli spadek napięcia 3 V. , bo punkt ten, jak wiemy, znajduje się dokładnie na środku oporu R . Ponieważ w tym szczególnym przypadku ślizgacz S znajduje się również na środku oporu R , pomiędzy punktami A i S nie będzie żadnej różnicy potencjałów i przez galwanometr G prąd nie popłynie.

Spójrzmy teraz na rys.27 b. Mamy tu do czynienia z tym samym układem, tylko że ślizgacz S przesunięty został na dolny skraj oporu R . Ponieważ w tym położeniu ślizgacz jest bezpośrednio połączony z ujemnym biegunem źródła, woltomierz, włączony pomiędzy ślizgacz a dodatni biegun źródła, wykaże nam napięcie 6 V. , podczas gdy spadek napięcia pomiędzy punktem O a dodatnim biegunem źródła wyniesie, w myśl poprzednich rozważań, 3 V. Stąd więc i pomiędzy punktem S i A będziemy mieli napięcie $6 \text{ V.} - 3 \text{ V.} = 3 \text{ V.}$ Wobec tego przez włączony między punkty A i S galwanometr G popłynie prąd w kierunku od A do S , co spowoduje wychylenie się strzałki galwanometru, dajmy na to, w lewo.

Ta sama sytuacja zaistnieje w wypadku, gdy ślizgacz S przesunięty zostanie na górny skraj opornika, tylko że prąd przez galwanometr będzie płynął w kierunku przeciwnym do poprzedniego, powodując wychylenie się strzałki przyrządu w prawo.



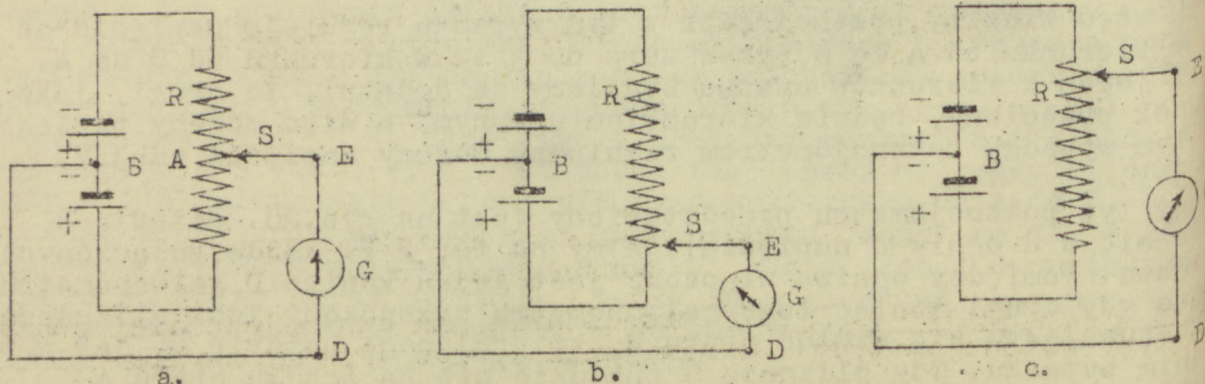
Rys.27. Potencjometr dwukierunkowy.

Jak więc widzimy, potencjometr w tym wypadku reguluje napięcie od $+3\text{ V}$. w kierunku od A do S przez zero do 3 V . w kierunku od S do A. Jeżeli jeden z kierunków uważać będziemy za dodatni, to drugi, jako kierunek przeciwny, będzie kierunkiem ujemnym, a więc możemy powiedzieć, w tym wypadku potencjometrem regulować możemy napięcie od -3 V do $+3\text{ V}$.

Inny typ potencjometru przedstawiony jest na rys.28. Bateria B składa się z 2 ogniwo o napięciu, dajmy na to, 2 V . każde, połączonych szeregowo. Pomiędzy ogniwa włączony jest jeden koniec D galwanometru G, podczas gdy drugi koniec tego galwanometru zakończony jest ślizgaczem przesuwającym się wzdłuż oporu R, zwierającego baterię B, jak w poprzednim wypadku. Gdy ślizgacz S znajdzie się na środku oporu A (rys.28 a), to zarówno przez punkt środkowy baterii do punktu D, jak

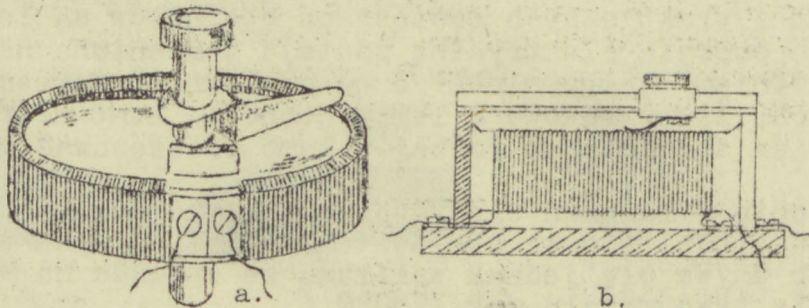
i przez punkt środkowy oporu A, a następnie przez ślizgacz do punktu przedostanie się zaledwie połowa całkowitego napięcia baterii B. A w punkcie E i punkcie D będzie ten sam potencjał. Gdy różnicy potencjałów niema, pomiędzy punktami E i D nie będzie płynął, jak wiemy, prąd, to też wskazówka galwanometru, między te punkty włączonego, zostanie nieruchoma.

Inaczej rzecz będzie się miała, gdy ślizgacz S znajdzie się na dolnym skraju oporu R. Wtedy, jak to widać wyraźnie z rys.28 b, pomiędzy końcami E i D napięcie będzie wynosiło 2 V. /połowa całkowitego napięcia na zaciskach baterii/, przyczym punkt D będzie miał potencjał dodatni w stosunku do punktu E. Gdy natomiast ślizgacz S przesuniemy na górny skraj oporu R /rys.28 c/, to napięcie między punktami E i D będzie również wynosiło 2 V., ale punkt E będzie miał w tym wypadku potencjał dodatni w stosunku do punktu D. Jasne jest, że gdy ślizgacz znajdzie się na dolnym skraju oporu R, przepływ prądu przez galwanometr G, powodujący wychylenie się wskazówki przyrządu w lewo, należy



Rys. 28. Inny typ potencjometru dwukierunkowego.

Wskazując różnicę potencjałów w dolnym ogniwie baterii B, w górnym zaś skrajnym położeniu ślizgacza S przepływ prądu, wywołujący wychylenie się wskazówki galvanometru w prawo, zachodzi skutek różnicy potencjałów na biegunach górnego ogniwa. W ten sposób, przez stopniowe przesuwanie ślizgacza S po oporze R, począwszy od dolnego skrajnego punktu, a skończywszy na górnym, otrzymujemy pomiędzy punktami D dowolne wartości napięć, zawierających się w granicach od -2 V. do $+2$ V., jeśli jeden z dwóch kierunków przepływu prądu przyjmiemy za dodatni.



Rys.29. Dwa najczęściej spotykane typy potencjometrów.

Podstawowa budowa potencjometrów. Rys.29 przedstawia nam dwa najczęściej spotykane typy potencjometrów. Do nawijania oporów używamy zwykle

chromonikieliny, manganinu lub konstantanu.

W niektórych potencjometrach ślizgacz przesuwana się po oporze grafity. Grafit ten jest nakropiony na wąski pasek papieru, po którym wodzi się ślizgacz.

R o z d z i a ł 8.

L a m p y e l e k t r y c z n e.

1. Żarówki. Jednym z praktycznych zastosowań oporników są lampy elektryczne, w których energia elektryczna zostaje zamieniona na energię świetlną. Rozróżniamy lampy elektryczne o włóknach żarzenia metalowych i węglowych, lampy łukowe i lampy neonowe. Lampami rtęciowymi i całym szeregiem specjalnych rodzajów lamp interesować się bliżej nie będziemy.

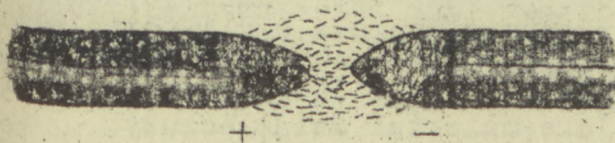
Włókna żarzenia w lampach elektrycznych o włóknie metalowym, czyli w tzw. żarówkach, robi się ze stopów takich metali, jak wolfram, osmium itd. Przeważnie używa się jednak wolframu ze względu na wysoką temperaturę topnienia tego metalu /ok. 3500°C /.

2. Sprawność lamp. Sprawność lamp oblicza się w watach na świecę /przyjmując za 1 świecę dzielność światła, odpowiadającą płomieniowi świecy z czystego wosku, ważącej ok. 75 g. i spalającej ok. 8 g. wosku na godzinę. Jest to jednostka, ściśle nieokreślona, bo dzielność światła takiej świecy zależy w znacznym stopniu od temperatury płomienia i zawartości tlenu w powietrzu/. W żarówkach o włóknie metalowym sprawność wynosi ok. 1 - 2 watów na świecę. W żarówkach węglowych - od 3 - 4 watów na świecę. Mimo małej sprawności, żarówek węglowych używa

się jednak często jako oporników redukcyjnych do ładowania akumulatorów z sieci prądu stałego ze względu na to, że przy ładowaniu małej ilości akumulatorów, przy połączeniu równoległym żarówek, potrzeba ich mniej, niż żarówek o włóknie metalowym, bo większy prąd przez nie przepływa.

Nowoczesnymi żarówkami są tzw. "półwatówki" - żarówki oszczędnościowe, w których sprawność wynosi od 0,5 do 0,8 wata na świecę. Bańka szklana takiej żarówki wypełniona jest jakimś gazem szlachetnym, jak np. kryptonem, argonem itp.

Lampy łukowe. Lampy łukowe, służące zwykle do oświetlania ulic, wymagają napięcia conajmniej 30 V. Przy zetknięciu się dwóch elektrod węglowych tej lampy tworzy się w miejscu styku duży opór, na którym powstaje bardzo wysoka temperatura /do 4000°C/. W temperaturze tej węgiel się ulatnia, tworząc parę, która w dalszym ciągu przewodzi prąd, żarząc się i dając silne, niebieskawe światło. Ulatnianie się cząsteczek węgla powoduje powstanie na elektrodzie dodatniej wkle-



Rys.30. Elektrody lampy łukowej.

śnięcia, widocznego na rys.30: Rozżarzony lotny węgiel między elektrodami nazywany łukiem elektrycznym. Ze względu na wysoką temperaturę, łuku tego używamy m.inn. do spawania i cięcia metali.

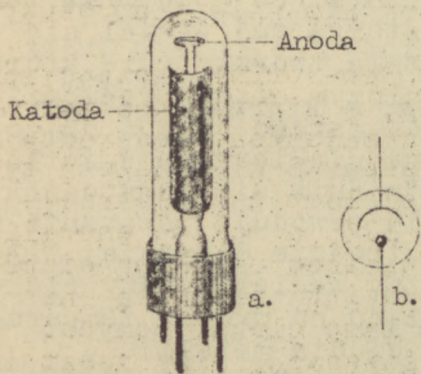
Ze względu na mgłę, przez którą światło lampy łukowej z trudem przenika, do oświetlania ulic używa się również lamp sodowych, które dają światło żółte.

Kłopotliwe w lampach łukowych jest spalanie się węgla przez łączenie się jego z tlenem z otoczenia. Wskutek stopniowego spalania

się elektrody węglowej odległość pomiędzy elektrodami wzrasta i jak mówimy, staje się "cieńszy". Aby temu zapobiec, stosuje się szereg przyrządów, automatycznie regulujących odległość elektrod w zależności od wielkości przepływającego prądu.

4. Lampy neonowe. Inny rodzaj lamp - to lampy neonowe. Jeśli chodzi o zastosowanie ich dla celów oświetleniowych, czy reklamowych, to napięcie, konieczne dla reklam neonowych, jest rzędu 12.000 V. Nas interesować raczej będzie zastosowanie lamp neonowych dla celów pomiarowych. Sprawa ta poruszona będzie przy omawianiu przyrządów pomiarowych.

Komórka światłoczuła. Na samym wstępie książki nadmieniliśmy, że energia elektryczna zamieniona być może na energię świetlną. Ze zjawiskiem tym spotykamy się w lampach elektrycznych, przykładowo podana została komórka światłoczuła czyli fotoelektryczna, zwana również selenową ze względu na materiał, używany dawniej prawie wyłącznie jako materiał światłoczuły.



Rys. 31. Komórka światłoczuła:
a. Widok z boku.
b. Oznaczenie schematyczne.

Komórka taka zbudowana jest na cokole podobnym do cokołu lampy radiowej. Wewnątrz bańki szklanej znajdują się dwie elektrody: anoda /dodatnia/ i katoda /ujemna/. Katoda pokryta jest materiałem światłoczułym, który emituje elektrony pod wpływem padających nań promieni świetlnych. Elektrony te przyciągane są przez anodę, na którą przyłożony jest potencjał dodatni w stosunku do katody. W zależności o natężenia światła, padającego na katodę

emituje ona mniej lub więcej elektronów, dając w obwodzie zewnętrznym wahania przepływającego prądu. Zjawisko to jest odwracalne, tzn., że pod wpływem zmiennych napięć, przyłożonych na anodę, natężenie światła, powstającego na katodzie, również się zmienia.

Komórka światłoczuła znalazła w technice nowoczesnej szereg zastosowań, z których wymienić można kino dźwiękowe, gdzie pod wpływem zmiany natężenia światła, przechodzącego przez zarejestrowane na taśmie filmowej kreski, zmienia się w jej obwodzie natężenie prądu. To zmienne natężenie prądu przy pomocy szeregu dodatkowych urządzeń wykorzystujemy następnie dla uruchomienia głośnika, dającego nam już drgania akustyczne w takt wahań prądu, a więc i w miarę przesuwania się kresek na taśmie filmowej.

Ponieważ materiał światłoczuły reaguje również na szereg promieni, dla ludzkiego oka niewidzialnych, komórka ta używana jest również do aparatów alarmowych, do automatycznego fotografowania włamywaczy i do niezliczonej ilości innych urządzeń.

Począwszy od wystawy światowej w 1940 r. w New-Yorku, zaczęto również stosować lampy oświetleniowe światłoczułe, w których pod wpływem przyłożonego stałego napięcia otrzymuje się, w zależności od rodzaju światłoczułego materiału, światło o dowolnym zabarwieniu. Zaletą tych lamp jest również ich duża sprawność. W zwykłej lampie o włóknie metalowym sprawność wynosi zaledwie około 5 - 10%, a resztę energii elektrycznej traci się na ciepło. W lampach światłoczułych na ciepło tracimy minimalną część energii elektrycznej, dzięki czemu są one bez porównania bardziej ekonomiczne od innych lamp elektrycznych. Swoboda w doborze barw, większa powierzchnia świecąca, mały koszt instalacji i niewielkie napięcie, potrzebne dla pracy tego typu lamp, sprawiają, że znajdują one szerokie zastosowanie również i jako lampy reklamowe, wypierając stopniowo reklamy neonowe.

E L E K T R O S T A T Y K A.

R o z d z i a ł 1.

Pojęcie linii sił pola elektrycznego. Wektory.

1. Przyciąganie się i odpychanie ładunków elektrycznych. Każde ciało możemy naładować elektrycznie przez potarcie. Np. przez potarcie pałeczki szklanej jedwabiem, możemy ją naładować dodatnio, a pałeczki ebonitową przez potarcie flanelą - ujemnie. Zawieszona na nitkach obie te pałeczki będą się wzajemnie przyciągały, mówiliśmy już bowiem o tym, że ładunki przeciwnych znaków przyciągają się, a ładunki jednakowych znaków odpychają się wzajemnie. Widzimy z tego, że ładunki przyciągają się na siebie pewną siłą. Jak tę siłę przedstawić? - Niema wątpliwości, że wielkość jej da się wyrazić liczbowo, każda siła jednak prócz wielkości ma jeszcze i kierunek, w którym działa, kierunek, którym nic nam nie mówi jej liczbowe wyrażenie wielkości. Widzimy zatem, że dla przedstawienia jakiegokolwiek siły musimy użyć metody liczbowej, ale graficznej, geometrycznej.

2. Wektory. Każdą siłę możemy, celem wyrażenia i jej wielkości i kierunku, przedstawić przy pomocy wektorów, tj. odcinków, których długość w dowolnej skali daje nam wyobrażenie o wielkości siły, a kierunek zobrazuje nam strzałka, jaką każdy wektor jest zakończony. Kilka wektorów podanych mamy na rys.32.

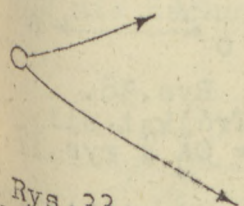
Na dowolne ciało może działać nie jedna, a kilka sił, które nazywamy siłami składowymi /rys.33/. Jasne jest, że, pod działaniem kilku nawet sił, ciało to porusza się będzie tylko w jednym kierunku,

tj. tak, jakdyby działała nań tylko jedna siła. Siłę tę, którą obliczyć możemy na podstawie sił składowych, nazywamy siłą wypadkową. Jest ona sumą sił składowych, ale nie arytmetyczną czy algebraiczną, ponieważ siły mają również i kierunek, który przy ich dodawaniu uwzględnić musimy, a geometryczną. Celem znalezienia tej sumy geometrycznej, musimy przede wszystkim skonstruować tzw. "równoległobok sił" przez wykreślenie równoległych do wektorów linii, przechodzących przez wierzchołki ich strzałek /rys.34/.



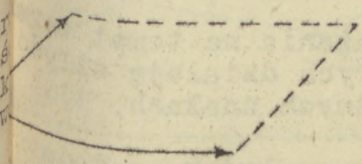
Rys.32.
Wektory.

Jeżeli połączymy punkt, z którego składowe siły wychodzą, z przeciwległym wierzchołkiem równoległoboku, w ten sposób wykreślonego, otrzymamy po zaopatrzeniu powstałego w ten sposób odcinka w strzałkę, wektor siły wypadkowej /rys.35/.

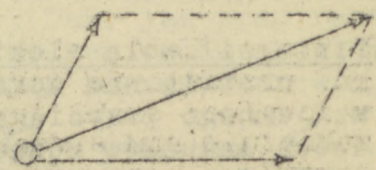


Rys.33.
Siły składowe.

Jeżeli działające na jeden punkt siły odchyłone są od siebie o 90° , to zamiast równoległoboku, otrzymamy prostokąt sił /rys.37/. Wektor OC da nam, według poprzednio omówionych zasad, obraz siły wypadkowej. Ponieważ odcinek BC równa się wektorowi OA, możemy sobie zaoszczędzić pracy, wykreślając zamiast prostokąta sił trójkąt sił i zmieniając tylko punkt zaczepienia



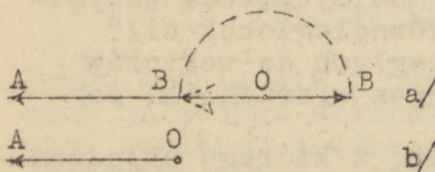
Rys.34.
Równoległobok sił.



Rys.35.
Siła wypadkowa.

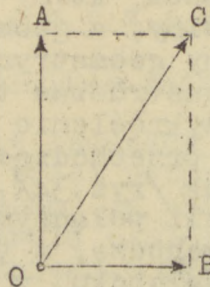
siły OA, tj. punkt, na który ta siła działa, co nam wyniku nie zmieni /rys.38/. Wektor siły wypadkowej OC da się teraz łatwo obliczyć z twierdzenia Pitagorasa:

$$OC = \sqrt{OB^2 + BC^2}$$



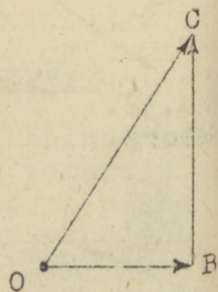
Rys.36.

- a. Siły składowe, odchylone o 180° .
- b. Siła wypadkowa $AO = AB$.



Rys.37.

Prostokąt sił.



Rys.38.

Trójkąt sił.

$BC = OA$ z rys.37.

Jeżeli działające na jeden punkt siły odchylone są od siebie pod kątem 180° , to geometryczne ich dodanie zamieni się w algebraiczne odjęcie /rys.36 a i b/.

3. Linie sił pola elektrycznego. Wszystkie te rozważania na temat wektorów ułatwią nam teraz wykreślenie linii, po których działają siły wzajemnego przyciągania się dwóch ładunków o różnych znakach, tj. dwóch ładunków różnoimiennych.

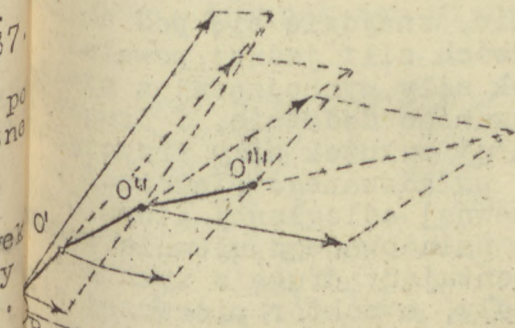
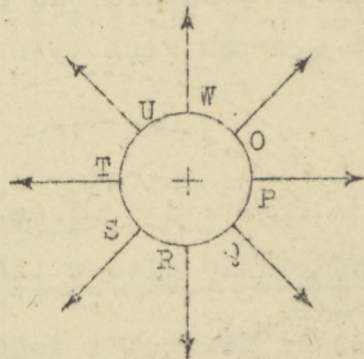
Spójrzmy na rys.39. Na rysunku tym mamy ciało, naładowane dodatnio. Protony tego ciała, niezrównoważone elektronami, będą dążyły do przyciągnięcia wolnych elektronów z najbliższego otoczenia. Siłę przyciągania możemy w tym wypadku zobrazować szeregiem wektorów, wychodzących

zm tego ciała i rozchodzących się we wszystkich kierunkach z wielu punktów na jego powierzchni, np. O, P, Q, R, S, T, U, W. Każdy z wektorów jest obrazem elektrycznej linii sił. Cały zespół linii nazywamy strumieniem elektrycznym lub, w wypadku, gdy ciało to jest nieruchome, strumieniem elektrostatycznym, gdyż stan taki jest j.t. stanem bezruchu. Strumień elektryczny oznaczamy grecką literą ψ /psi/. W przestrzeni, w której działają elektryczne linie sił, nazywamy polem elektrostatycznym, jeżeli nie zachodzi w nim żaden ruch ładunków.

Jeśli teraz w polu elektrycznym, powstającym wskutek

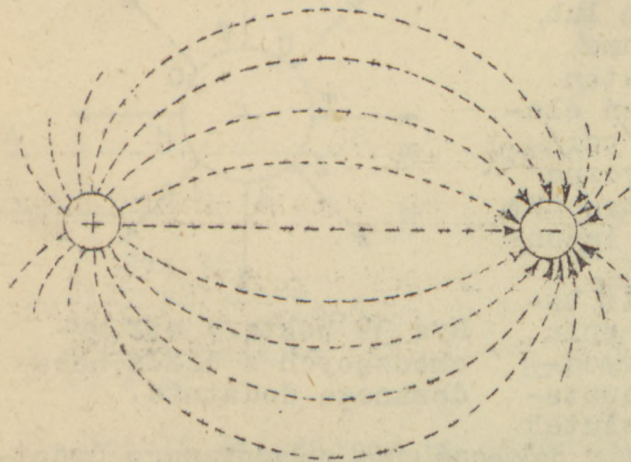
Rys.39. Wektory sił wychodzących z ciała, naładowanego dodatnio.

obecności jakiegoś ciała, naładowanego dodatnio, pojawi się inne ciało, naładowane ujemnie, oba te ciała będą wzajemnie na siebie działały. Tak, jak przy rozważaniu kierunku przepływu prądu elektrycznego przyjęliśmy za kierunek przepływu



Rys.40. Wykreślanie wektorów sił wzajemnego przyciągania się dwóch ciał, naładowanych różnoimiennie.

prądu kierunku od bieguna dodatniego do bieguna ujemnego, tak i z kierunku linii sił pola elektrycznego przyjmujemy kierunek od ciała, naładowanego dodatnio, do ciała, naładowanego ujemnie.



Rys.41. Obraz pola elektrycznego, powstałego wskutek wzajemnego działania na siebie dwóch ładunków różnoimiennych.

Gdybyśmy założyli, że oba te ciała naładowane składają się z szeregu bardzo luźno ze sobą związanych atomów, moglibyśmy sobie obrazić, że jakiś atom P pod działaniem jednej ze składowych sił wzajemnego przyciągania wyruszy po najkrótszej drodze w kierunku ciała, naładowanego ujemnie /rys.40/. Jednocześnie jakiś atom O, znajdujący się w innym punkcie na powierzchni ciała, naładowanego dodatnio, znajdzie się pod działaniem dwóch sił: jednej, powstałej wskutek siły, wychodzącej z ciała naładowanego dodatnio, i drugiej powstałej wskutek siły przyciągania ciała, naładowanego ujemnie. Z powodu pewnej odległości atomu O od ciała, naładowanego ujemnie, wektor reprezentujący drugą z tych sił jest mały, a wektor pierwszej

- duży. Pod wpływem działania tych dwóch sił atom O przesunie się po linii, zgodnej z kierunkiem działania siły wypadkowej, do punktu O'. W punkcie O' pierwsza z sił, z powodu pewnej odległości od ciała, naładowanego dodatnio, zmaleje, a druga wzrośnie. W ten sposób atom O

ajmle kolejno położenia O' , O'' i O''' , zataczając łuk, będący jednocześnie wektorem jednej z sił składowych sił wzajemnego przyciągania i tych dwóch ciał.

Tą samą metodą możemy wykreślić wszystkie linie sił pola elektrycznego. Otrzymany wtedy obraz pola i kierunku działania wszystkich sił składowych /rys.41/.

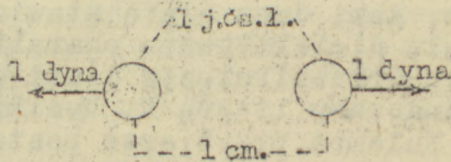
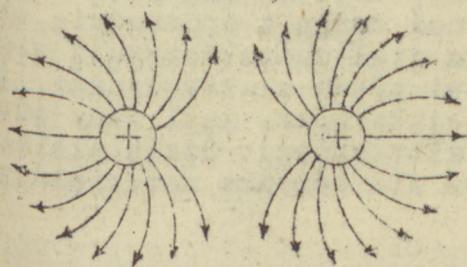
Obraz pola elektrycznego, powstałego wskutek przebiegu linii sił pomiędzy dwoma ciałami, naładowanymi jednoimiennie, daje nam rys.42.

R o z d z i a ł 2.

Prawo Kulomba. Układ j.es.1.

Natężenie, strumień, gęstość linii sił w polu elektrycznym.

Ładunek elektryczny. Omówiwszy kierunki, wielkości i rozkład linii sił pola elektrycznego, zajmiemy się z kolei wielkością ładunku elektrycznego. Ładunek ten mierzymy w jednostkach, zwanych jednostkami



rys.42. Pole elektryczne, powstałe pomiędzy dwoma jednoimiennymi ładunkami.

Rys.43. Ilustracja pojęcia jednostki elektrostatycznej ładunku.

elektrostatycznymi ładunku /w skrócie j.es.1/. Powiadamy, że ciało jest naładowane ilością elektryczności, odpowiadającą 1 j.es.1. wtedy gdy działa ono w próżni siłą 1 dyny na ciało o takim samym ładunku, odległe o 1 cm. Pojęcie 1 j.es.1. ilustruje na nam rys.42.

Gdy mamy dwa ciała o ładunkach Q_1 i Q_2 , a odległość pomiędzy nimi wynosi d cm. w próżni, siłę wzajemnego przyciągania /lub odpychania będziemy mogli obliczyć ze wzoru:

$$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{d^2} \text{ dyn.}$$

Wzór ten znany jest p.n. wzoru Kulomba.

Pojęcie j.es.1. nie należy mylić z pojęciem Kulomba, jednostki nie elektrostatycznej, a praktycznej. Wzajemna zależność wielkości jednego Kulomba i jednostki elektrostatycznej ładunku wynosi

$$1 \text{ Kulomb} = 3 \times 10^9 \text{ j.es.1.}$$

2. Stała dielektryczna. Jeżeli ośrodkiem nie jest próżnia, a jakiś ośrodek materialny, musimy wziąć pod uwagę tzw. "stałą dielektryczną" tego ośrodka. Stałą dielektryczną porównać można z opornością właściwą ciała. Podobnie, jak oporność właściwa ciała charakteryzuje wielkość oporu, jaki dane ciało stawia przepływowi prądu elektrycznego, tak i stała dielektryczna charakteryzuje niejako opór, jaki dany ośrodek stawia przeniknięciu linii sił pola elektrycznego. Stałą dielektryczną oznaczamy literą K . Wynika z tego, że dla ośrodka materialnego wzór Kulomba przybierze postać:

$$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{Kd^2} .$$

Dla dwóch równych ładunków $Q_1 = Q_2 = Q$:

$$F = \frac{Q^2}{Kd^2}$$

Natężenie pola elektrycznego. Pole elektryczne charakteryzujemy jego natężeniem. Natężenie pola w danym punkcie możemy mierzyć siłą, jakąby została wywarta na umieszczonej w tym punkcie jednostkę ładunku. Jeżeli oznaczymy natężenie pola elektrycznego przez X , a odległość tego punktu od naładowanego ciała przez d , to, w myśl definicji,

$$X = \frac{F}{Q} = \frac{Q}{Kd^2}$$

Natężenie pola elektrycznego można mierzyć w woltach na centymetr V/cm . Natężenie pola elektrycznego będzie miało jednostkę natężenia wtedy, gdy różnica potencjałów między dwoma punktami, odległymi od siebie o 1 cm, wynosi 1 wolt.

Jednostka ta przydaje się nam szczególnie w radiotechnice, gdzie natężenie pola elektrycznego jest kwestią pierwszorzędnej wagi. Ponieważ jednak różnice potencjałów w polach elektrycznych są tam rzędu mikrowoltów, a odległości dwóch punktów, pomiędzy którymi tę różnicę potencjałów się mierzy, są rzędu metrów, praktyczną jednostką pochodną, jaką w tych wypadkach stosujemy, jest mikrowolt na metr $\mu V/m$.

Gęstość strumienia elektrycznego. Jeżeli teraz przez gęstość strumienia elektrycznego określimy strumień, przypadający na jednostkę powierzchni, to, oznaczając strumień przez ϕ , powierzchnię przez s , a gęstość strumienia przez D , z definicji otrzymujemy

$$D = \frac{\psi}{s} .$$

Pomiędzy natężeniem pola elektrycznego a gęstością strumienia istnieje ścisła zależność. Całkowity strumień elektryczny, przechodzący przez powierzchnię kuli $/4\pi r^2/$ o promieniu r , opisaną wokół ładunku Q , wynosi Q linii sił pola elektrycznego. A zatem gęstość tego strumienia

$$D = \frac{Q}{4\pi r^2}, \text{ skąd } 4\pi D = \frac{Q}{r^2} .$$

Ponieważ natężenie pola elektrycznego

$$X = \frac{Q}{Kr^2}, \text{ więc } KX = \frac{Q}{r^2} .$$

Z obu tych wzorów przez porównanie otrzymujemy:

$$4\pi D = KX, \text{ skąd}$$

$$X = \frac{4\pi D}{K} \text{ i } D = \frac{KX}{4\pi} .$$

5. Jednostka elektrostatyczna różnicy potencjałów. Wiedząc, ilu jednostkom elektrostatycznym ładunku odpowiada 1 Kulomb, możemy obliczyć jednostkę elektrostatyczną różnicy potencjałów, pamiętając, że

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

i że jako jednostkę pracy przyjmujemy 1 erg, bo dla określenia jednostki elektrostatycznej ładunku z prawa Kulomba przyjęliśmy, że siły wzajemnego przyciągania /lub odpychania/ wynoszą 1 dynę.

A zatem

1 jednostka elektrostatyczna różnicy potencjałów = $\frac{1 \text{ erg}}{1 \text{ j.es.l.}}$

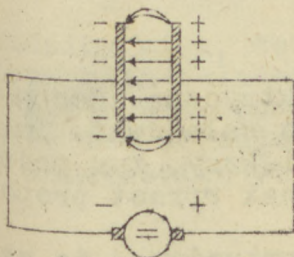
Obliczając jednostkę tę w woltach, otrzymujemy:

$$\frac{1 \text{ erg}}{1 \text{ j.es.l.}} = \frac{\frac{1}{10^7} \text{ dżoula}}{\frac{1}{3 \times 10^9} \text{ Kulomba}} = \frac{300 \text{ dżouli}}{1 \text{ Kulomb}} = 300 \text{ woltów.}$$

R o z d z i a ł 3.

K o n d e s a t o r y.

Pojemność kondensatora. Pojęcie różnicy potencjałów w przestrzeni może też być wyprowadzone i w inny sposób, a mianowicie przez zanalizowanie zachowania się ładunku w polu elektrycznym jednorodnym. Pole elektryczne jednorodne jest to takie pole, w którego każdym punkcie natężenie jego ma tę samą wartość i kierunek. Pole takie w praktyce spotykamy w kondensatorach, tj. urządzeniach do "przechowywania" ładunków elektrycznych /rys.44/.



Rys.44. Jednorodne pole elektryczne w kondensatorze.

Kondensator składa się z conajmniej dwóch płytek metalowych, zwanych okładkami, oddzielonych od siebie izolatorem, który w tym wypadku nazywamy dielektrykiem. W rzeczywistości linie sił pola elektrycznego na krancach okładek kondensatora wyginają się z lekka nazewnątrz, z dość

dokładnym jednak przybliżeniem możemy przyjąć, że pole elektryczne powstałe pomiędzy okładkami kondensatora, jest całkowicie jednorodne.

Jeżeli oznaczymy odległość pomiędzy okładkami kondensatora przez d , to, przypuściwszy, że jakiś ładunek jednostkowy mógłby pod działaniem natężenia pola X przedostać się poprzez szerokość dielektryka d na drugą płytkę, praca, potrzebna na przeniesienie tego ładunku, wyniosłaby

$$Xd.$$

Z definicji różnicy potencjałów wynika, że wartość ta odpowiada również różnicy potencjałów pomiędzy dwiema okładkami kondensatora. A więc

$$\frac{W}{Q} = V = Xd.$$

Natężenie pola elektrycznego

$$X = \frac{4 \pi D}{K} = \frac{4 \pi Q}{Ks},$$

a więc różnica potencjałów pomiędzy dwiema okładkami kondensatora

$$V = Xd = \frac{4 \pi Qd}{Ks}.$$

Każde ciało ma swoją określoną pojemność elektryczną. Cecha ta określa nam, jak dużym ładunkiem możemy ciało to naładować. Im ładunek, którym się dane ciało da naładować, jest większy, tym pojemność tego ciała jest większa, zachodzi tu więc stosunek wprost proporcjonalny.

Kondensator, który chcemy naładować, możemy przyrównać do naczynia szklanego o określonej pojemności, w które chcemy wtłoczyć jak największą ilość powietrza. Im bardziej się to naczynie wypełnia, czyli im mniej się pozostała pojemność jego zmniejsza, tym większej siły użyć musimy do wtłaczania dalszych ilości powietrza. Podobnie

W kondensatorze, im pojemność jego się zmniejsza, tym większa musi być różnica potencjałów dla naładowania go tym samym ładunkiem. Zaczodzi tu więc stosunek odwrotnie proporcjonalny.

Możemy zatem napisać, że

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

gdzie przez C oznaczamy pojemność danego ciała.

Z poprzednich wywodów wiemy jednak, że różnica potencjałów pomiędzy dwiema okładkami kondensatora

$$V = \frac{4 \pi d Q}{K_s}$$

Podstawiając to do wzoru

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

otrzymujemy

$$C = \frac{Q}{\frac{4 \pi d Q}{K_s}} = \frac{K_s}{4 \pi d}$$

Widzimy więc, że pojemność kondensatora jest tym większa, im powierzchnia okładek /s/ jest większa i im odległość pomiędzy płytkami, a więc grubość dielektryka /d/ jest mniejsza.

Wzór ten stosuje się tylko do kondensatorów dwuokładkowych. Gdy mamy kondensator wielookładkowy, stosujemy wzór:

$$C = \frac{K_s}{4 \pi d} \cdot /n-1/,$$

gdzie n oznacza ilość okładek. Możemy też użyć wzoru:

$$C = \frac{K_s}{4 \pi d} \cdot m,$$

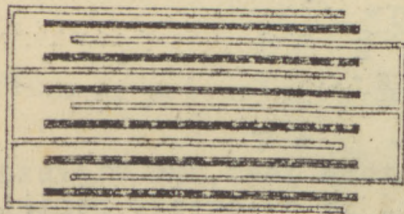
gdzie m oznacza ilość płytek dielektryka. Wzory te bez trudu zrozumieamy, jeżeli uprzytomnimy sobie, że kondensator wielopłytkowy jest zespołem razem połączonych kondensatorów dwupłytkowych /rys.45/.

2. Jednostka pojemności. Pojemność kondensatorów mierzymy w jednostkach zwanych faradami. Jeżeli potencjał danego ciała wzrasta o 1 wolt, gdy doładujemy doń ładunek 1 Kulomba, to ciało to ma pojemność 1 Farada. W praktyce jest to jednak jednostka o wiele za duża, to

używa się przeważnie milionowej części Farada - mikrofarada $/\mu F/$. Często też spotykamy pikofarady $/pF/$; 1 pikofarada $= 1 \mu\mu F = 10^{-12} F$.

Jednostką elektrostatyczną pojemności jest centymetr pojemności $/cmC/$.

Wzajemna zależność pomiędzy cmC a Faradem da się łatwo obliczyć przez porównanie obu tych wielkości. A więc



Rys.45. Kondensator wielopłytkowy. $1 \text{ cmC} = \frac{1 \text{ j.es.ł.}}{1 \text{ j.es.ł. różnicy potencjałów}}$

$$= \frac{1}{3 \times 10^9} \text{ Kulomba} = \frac{1}{9 \times 10^{11}} \text{ Farada} = \frac{10}{9} \text{ pF. Stąd } 1 \text{ pF} = 0,9 \text{ cmC.}$$

Stała dielektryczna. W poprzednio podanych wzorach na pojemność kondensatora, wynik otrzymamy w cmC, gdy powierzchnię płytek /s/ podamy w cm², a odległość między płytkami /d/ w cm. Z wzorów tych wynika, że pojemność kondensatora będzie tym większa, im stała dielektryczna dielektryka będzie większa. To też stałą dielektryczną badamy zwykle przez porównanie dwóch kondensatorów o takich samych rozmiarach, ale o różnych dielektrykach. Stała dielektryczna powietrza wynosi około 1,00059 w porównaniu ze stałą dielektryczną w próżni, przyjętą za 1. Wobec tego, ponieważ praktycznie trudno jest wykonać kondensator, którego dielektrykiem byłaby próżnia, obliczamy stałą dielektryczną przez porównanie pojemności kondensatorów, w których dielektrykami są różne ciała izolujące, z pojemnością kondensatorów, których dielektrykiem jest suche powietrze w normalnych warunkach /0°C, 760 mm.ciśn.atmosf./. Daje to nam stałą dielektryczną różnych ciał z dostatecznie dokładnym przybliżeniem.

Poniżej podane są stałe dielektryczne typowych dielektryków:

ebonit	2 - 3,2	porcelana	4,4 - 6,8
suchy papier	1,5	woda destylowana	80
mika	5		

Wytrzymałość na przebicie. Charakteryzując dielektryk jakiegoś kondensatora, nie wystarczy podać stałej dielektrycznej, a trzeba poza tym wspomnieć o jego wytrzymałości na przebicie. Jeżeli napięcie na okładkach kondensatora jest zbyt duże, to wtedy prąd przesunięcia w dielektryku, o czym już mówiliśmy poprzednio, zamieni się może na rzeczywisty przepływ elektronów przez dielektryk. Jeżeli dielektrykiem jest ciało stałe, to w miejscu przeskoaku iskry, tj. wyładowania elektrycznego, powstaje otwór. Wytrzymałość na przebicie podaje się zwykle w woltach na milimetr grubości dielektryka. Należy zaznaczyć, że wytrzymałość na przebicie nie wzrasta wprost proporcjonalnie do wzrostu grubości dielektryka. Dla przykładu podane są

poniżej dane, określające wytrzymałość na przebicie niektórych dielektryków

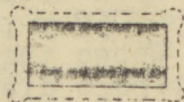
ebonit	50000 V.
mika	60000 V.
mika o grub. 0,1 mm	10000 V.



Kula



Elipsoid



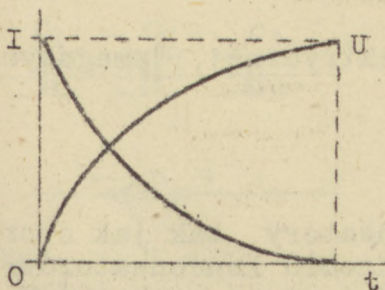
Walec

Rys.46. Rozmieszczenie ładunków elektrycznych na powierzchni ciał o różnych kształtach.

5. Rozłożenie się ładunków na powierzchni ciał. Kondensator jest urządzeniem o specjalnie dużej pojemności, ładunek elektryczny może się jednak gromadzić na wszelkiego rodzaju ciałach w mniejszym lub większym stopniu. Ładunek elektryczny nie rozkłada się równomiernie na powierzchni całego ciała, lecz rozmieszczenie jego zależy od kształtu tego ciała. Rys.46 daje nam wyobrażenie o tym, w jaki sposób ładunki rozkładają się na powierzchni ciał w zależności od ich kształtów. Jak widzimy, ładunki gromadzą się na ostro zakończonych brzegach ciał. Tym się tłumaczy, że piorunochrony są zwykle zaopatrzone w ostrza.

6. Napięcie i prąd ładowania i rozładowania. W miarę ładowania się kondensatora, napięcie na jego okładkach stopniowo wzrasta, natomiast prąd /ilość ładunków, przepływających w jednostce czasu/ ładujący, czyli prąd ładowania, który w pierwszej chwili jest największy, stopniowo maleje. Krzywe napięcia i prądu na kondensatorze podane są

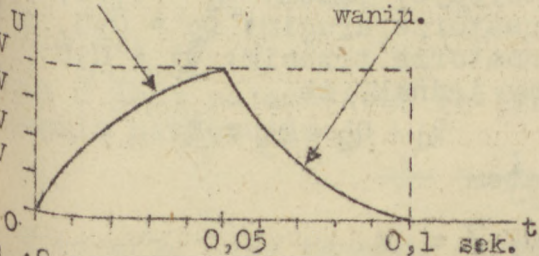
wykresie na rys.47. Zmiany napięcia i prądu na kondensatorze są nie-
 zmiernie ważną podstawą dla naszych dalszych rozważań. Sprawa ta
 będzie poruszana jeszcze przy omawianiu prądu zmiennego. Wykres
 wzrostu napięcia przy ładowaniu kondensatora i malenia napięcia
 przy rozładowaniu podany jest na rys.48.



Rys.47. Krzywe napięcia i prądu na kondensatorze.

Wzrost U na kondensatorze przy ładowaniu.

Malenie U na kondensatorze przy rozładowaniu.



Rys.48. Wykres zmian napięcia na okładkach kondensatora.

7. Moc i praca prądu ładowania.
 Całkowita ilość ładunków Q , którymi ładujemy kondensator o pojemności C pod napięciem V , wynosi

$$Q = CV.$$

Ponieważ $I = \frac{Q}{t}$, więc z podstawienia otrzymujemy wartość prądu ładowania:

$$I = \frac{CV}{t}.$$

W ciągu czasu t napięcie zmienia się z chwili na chwilę. Jeżeli jednak końcową, największą jego wartość oznaczymy przez V , to średnia wartość napięcia wyniesie

$$\frac{V}{2} \text{ woltów.}$$

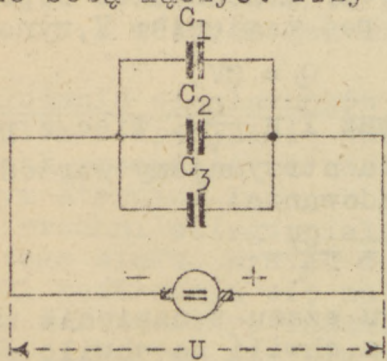
Stąd moc, użyta na ładowanie kondensatora, wyniesie

$$P = VI = \frac{CV}{t} \cdot \frac{V}{2} = \frac{CV^2}{2t} \text{ watów.}$$

Praca zatem, a więc i zasób energii elektrycznej, "zmagazynowanej" w kondensatorze, wyniesie

$$W = Pt = \frac{CV^2}{2t} \cdot t = \frac{CV^2}{2} \text{ dżauli.}$$

8. Równoległe łączenie kondensatorów. Kondensatory, tak jak opory, mogą być ze sobą łączone. Przy równoległym połączeniu kondensatorów/rys. 49



Rys. 49. Równoległe połączenie kondensatora.

napięcie U jest na wszystkich kondensatorach jednakowe. Ładunek Q rozdzieli się na wszystkich kondensatorach tak że suma ładunków Q_1 , Q_2 i Q_3 na kondensatorach C_1 , C_2 i C_3 równać się będzie całkowitemu ładunkowi. Na kondensatorze C_1 zatem: $Q_1 = C_1 \cdot U$, na kondensatorze drugim: $Q_2 = C_2 \cdot U$, a na kondensatorze trzecim: $Q_3 = C_3 \cdot U$.

Wiemy jednak, że

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q.$$

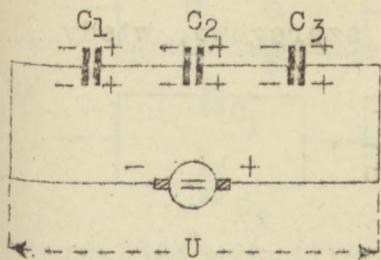
A zatem

$$C_1 U + C_2 U + C_3 U = U / C_1 + C_2 + C_3 / = Q.$$

Stąd

$C_1 + C_2 + C_3 = \frac{Q}{U} = C$, gdzie C jest pojemnością zastępczą dla całego układu.

Szeregowe łączenie kondensatorów. W wypadku połączenia szeregowego kondensatorów /rys.48/, ładunek na każdej z okładek każdego kondensatora jest co do wielkości taki sam i wynosi Q , natomiast napięcie całkowite U rozłoży się na 3 spadki napięć: U_1 , U_2 i U_3 , których suma równa się U , czyli napięciu źródła. Ale wiemy, że



Rys.50. Szeregowe połączenie kondensatorów.

$$U_1 = \frac{Q}{C_1}, U_2 = \frac{Q}{C_2} \text{ i } U_3 = \frac{Q}{C_3}.$$

Stąd

$$\begin{aligned} U &= U_1 + U_2 + U_3 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} = \\ &= Q \left/ \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right/ , \end{aligned}$$

zatem

$$\frac{U}{Q} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}, \text{ a } \frac{Q}{U} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} = C,$$

gdzie C jest pojemnością zastępczą układu. Wzór ten możemy napisać w formie następującej:

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

W wypadku, gdy mamy do czynienia z dwoma kondensatorami, połączonymi szeregowo,

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

doprowadzając do wspólnego mianownika, otrzymujemy:

$$\frac{1}{C} = \frac{C_1 + C_2}{C_1 \cdot C_2}, \text{ skąd } C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}.$$

Gdy n kondensatorów jednakowych połączymy szeregowo, wtedy

$$C_1 = C_2 = \dots = C_n,$$

a więc

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_1} + \dots + \frac{1}{C_n},$$

zatem

$$\frac{1}{C} = \frac{n}{C_1}, \text{ skąd } C = \frac{C_1}{n}.$$

10. Równoległe łączenie kondensatorów o jednakowej pojemności. Przy równoległym połączeniu n jednakowych kondensatorów:

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n,$$

a więc

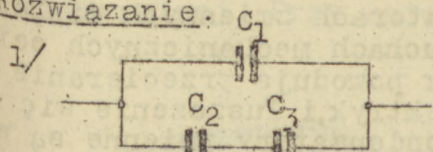
$$C = nC_1.$$

Widzimy więc że pojemności w obwodzie dodają się odwrotnie, niż opory.

Przykład.

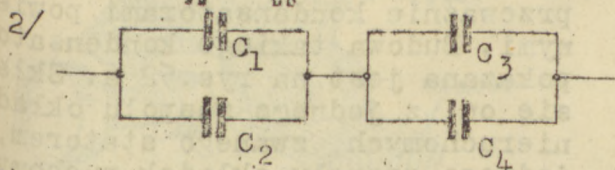
Jak można otrzymać pojemność $0,004 \mu\text{F}$ układu czterech kondensatorów o pojemności $0,002 \mu\text{F}$, $0,003 \mu\text{F}$, $0,005 \mu\text{F}$ i $0,006 \mu\text{F}$ każdy? Jeżeli wytrzymałość na przebicie każdego z nich wynosi 500 V ., jaka będzie wytrzymałość na przebicie całego układu?

Rozwiązanie:



$C_1 = 0,002 \mu\text{F}.$
 $C_2 = 0,003 \mu\text{F}.$
 $C_3 = 0,006 \mu\text{F}.$

Wytrzymałość na
przebiecie: 500 V.



$C_1 = 0,002 \mu\text{F}.$
 $C_2 = 0,006 \mu\text{F}.$
 $C_3 = 0,003 \mu\text{F}.$
 $C_4 = 0,005 \mu\text{F}.$

Wytrzymałość na
przebiecie: 1000 V.

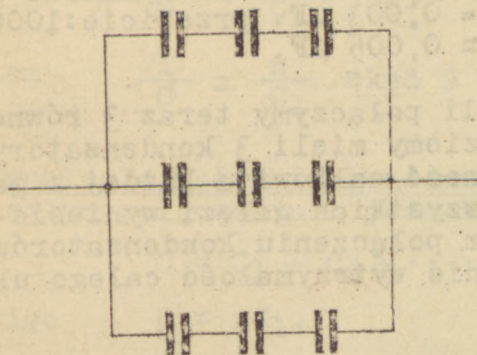
Wytrzymałość układu na przebiecie. Jeżeli połączymy teraz 3 równoległe gałęzie, przyczym w każdej z nich będziemy mieli 3 kondensatory jednakowe, połączone szeregowo, to pojemność całkowita każdej z gałęzi wyniesie $C/3$, a pojemność całkowita wszystkich gałęzi wyniesie $(C/3) \cdot 3 = C$. Wydawałoby się, że na takim połączeniu kondensatorów nie się nie zyskuje, wzrasta jednak znacznie wytrzymałość całego układu na przebiecie /rys.51/.

R o z d z i a ł 4.

Budowa kondensatorów.

Kondensatory możemy podzielić rozmaicie: na kondensatory stałe i zmienne, w zależności od tego, czy mają stałą pojemność, czy zmienną, na kondensatory rurkowe i pudełkowe, w zależności od ich kształtu, i na kondensatory papierowe, mikowe i elektrolityczne, w zależności od rodzaju użytego dielektryka i sposobu fabrykacji.

1. Kondensatory zmienne. Obecnie w kondensatorach zmiennych dielektrykiem jest przeważnie powietrze, bo przy ruchach mechanicznych ocieraniu się okładek kondensatora o dielektryk powoduje przecieranie się papieru, gdy papier jest użyty jako dielektryk, i łuszczenie się miki, gdyby mika była jako dielektryk użyta. Kondensatory zmienne są więc



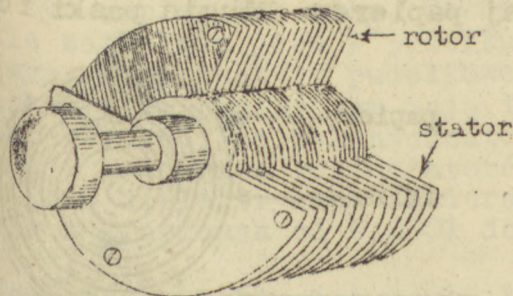
Rys. 51. Łączenie kondensatorów mieszane.

przeważnie kondensatorami powietrznymi. Budowa takiego kondensatora pokazana jest na rys. 52 a. Składa się on z jednego zespołu okładek nieruchomych, zwanego statorem, i jednego zespołu okładek ruchomych zwanego rotorem. Zmianę pojemności uzyskuje się w takim kondensatorze przez wkręcanie rotora w stator, dlatego też tego typu kondensatory nazywa się często kondensatorami obrotowymi. Im bardziej płytki rotora zachodzą na płytki statora, tym pojemność kondensatora wzrasta. Pojemność kondensatora obrotowego jest więc proporcjonalna do kąta α /rys. 52 b /.

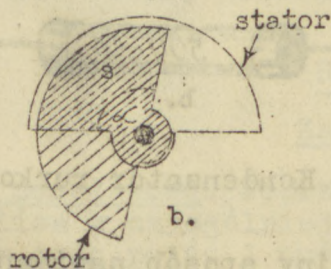
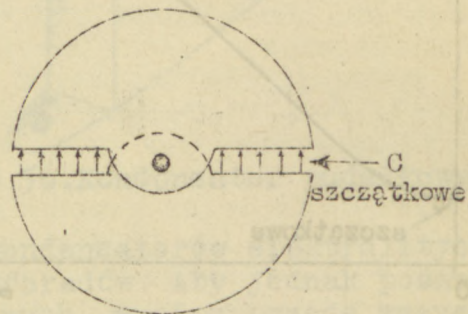
Oczywiście jest, że pojemność kondensatora obrotowego wzrasta wskutek zwiększania się powierzchni czynnej s . Maksimum pojemności otrzymano przez całkowite wkręcenie płytek rotora w płytki statora, a minimum - przez całkowite wykręcenie tych płytek. Wydawałoby się, że gdy płytki rotora całkowicie wykręcimy z płytek statora, pojemność kondensatora będzie równa zeru, jednakże w kondensatorze zawsze mamy jakąś pojemność szczerątkową

między krawędziami okładek /rys.53 /.

Pojemność ta w litych kondensatorach wynosi od 10 - 15% pojemności maksymalnej. Przy najczęściej używanych w radiotechnice kondensa-



a.



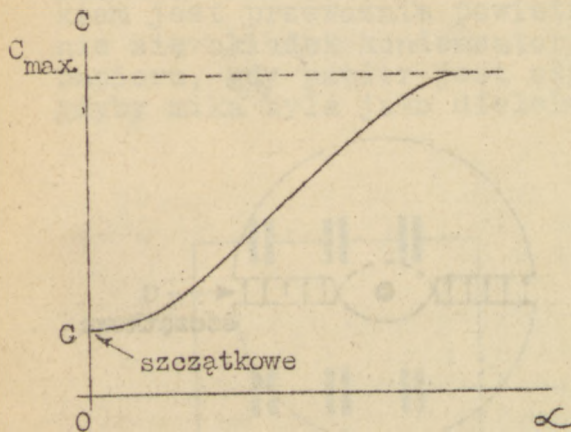
b.

Rys.52. Budowa kondensatora zmiennego.

Rys.53. Pojemność szczątkowa w kondensatorze obrotowym.

torach obrotowych o pojemności 500 cmC, pojemność szczątkowa nie przekracza 20 cmC w kondensatorach dobrze wykonanych. Kształt płytek kondensatora obrotowego niekoniecznie musi być taki, jak na rys. rys. 52 i 53, gdzie pojemność kondensatora zmienia się proporcjonalnie do

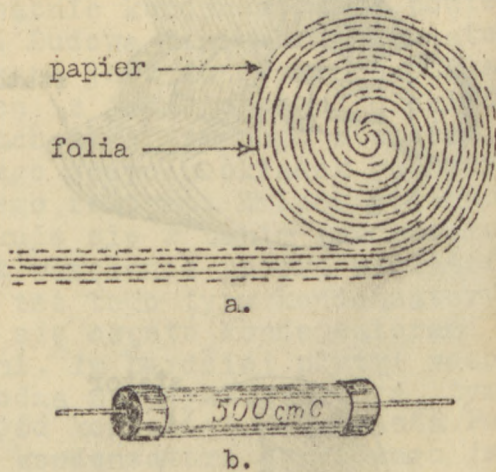
kąta obrotu płytek rotora.



Rys. 54. Wykres zmiany pojemności kondensatora obrotowego w zależności od kąta α .

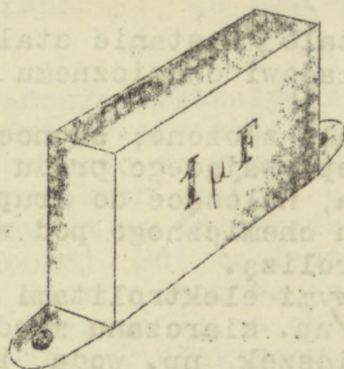
i papieru zostają zwinięte w rolkę, której końce zalewa się parafiną lub smołą /rys. 55 a i b/. Oczywiście, pasków papieru i folii może być kilka. Istnieje jeszcze tzw. bezindukcyjny sposób nawijania tego typu kondensatorów, sprawa ta poruszona jednak zostanie po omówieniu zjawiska indukcji magnetycznej. Pojemność tego rodzaju kondensatorów zawiera się zwykle w granicach od 0,01 do 4 μF .

2. Kondensatory rurkowe. Kondensatory stałe, rurkowe, wykonane są z cienkiej folii metalowej, przekładanej papierem. Długie paski folii



Rys. 55. Kondensator rurkowy.

Kondensatory pudełkowe. Kondensatory pudełkowe /rys.56/, dzisiaj już przeważnie nieużywane, zbudowane są z szeregu cienkich płytek metalowych, przedzielonych dielektrykiem, którym może być papier lub mika. Całość zwykle zamknięta jest w pudełku metalowym. Kondensatory pudełkowe z dielektrykiem papierowym mają taką samą pojemność, co i kondensatory rurkowe. Pojemność kondensatorów z miką jako dielektrykiem zawiera się zwykle w granicach od 0,0001 do 2 μF .



Rys.56.Kondensator pudełkowy.

Kondensatory elektrolityczne. Pojemność kondensatorów elektrolitycznych wynosi zwykle od 4 do kilkuset mikrofaradów. Aby jednak poznać zasady budowy kondensatorów elektrolitycznych, musimy przede wszystkim poznać zasady elektrolizy.

R o z d z i a ł 5.

Zasady elektrolizy.

Pojęcia podstawowe. Poprzednio wspomniane już zostały elektrolity i elektroliza w najogólniejszych zarysach. Obecnie zajmiemy się sprecyzowaniem tych pojęć i omówieniem związanych z nimi zjawisk.

Wszystkie przewodniki prądu elektrycznego możemy podzielić na dwie grupy:

1/ metale /w stanie stałym i ciekłym / i ciecze, które nie podlegają rozkładowi chemicznemu pod wpływem przechodzącego przez nie prądu oraz

2/ ciała złożone, skoncentrowane lub w roztworze, w których pod wpływem przepływającego prądu rozkład chemiczny zachodzi.

Ciała, należące do grupy drugiej, nazywamy elektrolitami, a proces rozkładu chemicznego pod wpływem przepływającego przez nie prądu - elektrolizą.

Typowymi elektrolitami są roztwory kwasu siarkowego, kwasu solnego i soli /np. siarczanu miedzi, siarczanu sodu itp./. Ciecze czyste bez domieszek, np. woda, kwas siarkowy i alkohol /oczyszczone/ nie podlegają elektrolizie.

Przepływ prądu przez elektrolit wywołujemy przez zanurzenie w nim dwóch płytek lub prętów metalowych, zwanych elektrodami, na których mamy pewną różnicę potencjałów. Elektroda, przez którą prąd wchodzi do elektrolitu, nazywa się anodą, a elektroda, przez którą prąd z elektrolitu wychodzi - katodą. Pod wpływem przepływu prądu przez elektrolit, jak już to powiedzieliśmy, następuje elektroliza, którą możemy podzielić na dwa kolejne procesy:

1/ dysocjacja, czyli rozszczepienie cząsteczek elektrolitu, tj. ich podział na atomy, względnie na cząsteczki o mniejszej ilości atomów składowych,

2/ jonizacja, czyli proces naładowania cząsteczek i atomów, powstających wskutek dysocjacji. Naładowane cząsteczki lub atomy nazywamy jonami. Rozróżniemy jony, naładowane dodatnio, i jony, naładowane ujemnie. Jony dodatnie dążą oczywiście do katody, a jony ujemne - anody. Dlatego też jony, osiadające na katodzie, nazywamy kationami, a jony, osiadające na anodzie - anionami.

Omawiając zjawisko elektrolizy, należy zaznaczyć, że proces jonizacji zachodzi również i w gazach.

Elektronowa teoria elektrolizy. Najnowsze badania wykazały, że między budową atomu a zjawiskiem elektrolizy zachodzi ścisły związek. Jak już wiemy, elektrony poszczególnych atomów zawarte są w pewnych powłokach. Ilość elektronów w niekompletnych powłokach stanowi o tzw. wartościowości danego pierwiastka. Rozpatrzmy to na przykładzie ogólnie znanego związku chemicznego - soli kuchennej. Sól ta jest związkiem sodu /symbol Na/ i chloru /symbol Cl/. Liczba atomowa, a więc ilość wirujących elektronów w atomie sodu, wynosi 11, a chloru - 17. Ponieważ pierwsza powłoka orbit w atomie zawiera 2 elektrony, druga - 8 i trzecia - 8, zarówno atom sodu, jak i chloru, nie mają ostatniej powłoki w stanie kompletnym, przy czym atom sodu ma nadmiar jednego elektronu ponad kompletny stan powłok, a atom chloru ma niedomiar jednego elektronu. Jasne więc jest, że atomy sodu i chloru chętnie się ze sobą łączą, w ten bowiem sposób atom chloru uzupełnia sobie brakujący elektron z atomu sodu, w którym akurat jeden elektron znajduje się w nadmiarze.

Gdy teraz cząsteczka NaCl rozpuszczona zostanie w wodzie, łatwo dojdzie do dysocjacji i rozpadnie się na atom chloru i atom sodu, ale nie dojdzie do jonizowania, tzn. naładowane. Atom chloru będzie miał teraz jeden elektron w nadmiarze, czyli będzie naładowany ujemnie, a atom sodu będzie miał jeden elektron w niedomiarze, czyli będzie naładowany dodatnio. Oznaczamy to symbolami Na⁺ i Cl⁻. Zjawisko to zachodzi dlatego, że siła, z jaką atom chloru przyciąga do siebie ten dodatkowy elektron, jest od siły, z jaką atom sodu ten "swoje" elektron przyciąga. Zastanawiający jest fakt, czemu rozpuszczenie w wodzie tak znakomicie ułatwia proces elektrolizy, a szczególnie umożliwia dysocjację. Jeżeli jednak przypomnimy sobie, że stała dielektryczna wody wynosi ok. 80, to zrozumiemy, że przez rozpuszczenie w niej soli znacznie

zredukowane zostaną międzyatomowe siły wzajemnego przyciągania sił atomów chloru i sodu, co bardzo ułatwia rozpadnięcie się cząsteczek soli na te dwa atomy.

Z grubsza omówione tu zagadnienie poruszone jeszcze będzie przy rozpatrywaniu zasady działania ogniw.

3. Równoważnik elektrochemiczny ciał. Każde ciało ma swój równoważnik elektrochemiczny. Równoważnik elektrochemiczny jest to masa danego ciała, jaka może być wyzwolona przez prąd o natężeniu 1 A w ciągu 1 sek. Równoważnikiem elektrochemicznym srebra np. jest 0,001118 g/Kul. Teraz możemy zrozumieć, skąd wypłynęła definicja ampera międzynarodowego.

4. Zasada galwanotechniki. Bardzo wiele ciał złożonych da się rozłożyć przez prąd elektryczny po uprzednim rozpuszczeniu ich w wodzie. Metale zawarty w takim roztworze, zawsze zostaje wyzwolony na katodzie podobnie jak wodór przy elektrolizie wody/. Na tej zasadzie oparta jest galwanotechnika, tj. technika pokrywania metalem pewnych przedmiotów /chromowanie, niklowanie itp./. Na tej samej drodze otrzymywać można metale w stanie czystym.

R o z d z i a ł 6.

Kondensatory elektrolityczne.

1. Budowa kondensatorów elektrolitycznych. Po poznaniu tych najogólniejszych zasad elektrolizy, możemy przejść do omówienia budowy kondensatorów elektrolitycznych. Formuje się je przeważnie przez zanurzenie elektrody aluminiowej w specjalnym elektrolicie, która, dzięki procesowi elektrolizy, pokrywa się niezmiernie cienką warstwą tlenku

niezawsze, druga elektroda jest też zrobiona z aluminium. Ze względu na bardzo cienki dielektryk, pojemność takiego kondensatora może być bardzo duża. Nie ma żadnych trudności w otrzymywaniu kondensatorów elektrolitycznych o pojemności rzędu 1000 μF .

2. Załączanie kondensatora elektrolitycznego w obwód. Przy załączaniu takiego kondensatora w obwód pamiętać należy, że nie jest obojętną którą okładkę połączymy z dodatnim biegunem źródła siły elektromotorycznej, a którą z ujemnym, przy mylnym bowiem połączeniu okładek prąd będzie płynął przez kondensator /i przez elektrolit/, kontynuując ujemną elektrolizę i powodując grubienie warstwy tlenku aluminium na elektrodzie dodatniej, a więc zmniejszając, w miarę przepływu prądu, pojemność kondensatora.

Wadą tych kondensatorów jest ich mała wytrzymałość na przebicie

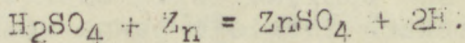
OGNIWA PIERWOTNE I WYÓRNE.

R o z d z i a ł 1.

Ogniwa pierwotne.

Zasada działania ogniw. Jednym ze sposobów wytwarzania siły elektromotorycznej jest jej otrzymywanie na drodze procesów elektrochemicznych.

Jeżeli zanurzymy dwa różne metale, np. miedź /Cu/ i cynk /Zn/ w roztworze kwasu siarkowego /H₂SO₄/, to kwas siarkowy, działając na cynk, spowoduje powstanie siarczynu cynku /ZnSO₄/ i wodoru /2H/. Proces ten możemy wyrazić wzorem chemicznym:



Podczas całego tego procesu zachodzić będzie znane już nam składając zjawisko jonizacji. Reakcja chemiczna, zachodząca pomiędzy kwasem siarkowym a cynkiem, spowoduje ujemne naładowanie się płytki cynkowej. Druga płytka, miedziana, zostanie wskutek przemian elektrochemicznych w całym tym zespole naładowana dodatnio. Jeżeli obu tych płytek nie połączymy na zewnątrz żadnym przewodnikiem prądu elektrycznego, płytki te naładują się tylko do pewnej wartości, dając nam w ten sposób pewną różnicę potencjałów. Różnica ta powstaje zatem wskutek procesów elektrochemicznych, zachodzących wewnątrz tego zespołu, który nazywamy ogniwem. Te procesy elektrochemiczne wywołują powstanie siły elektromotorycznej wewnątrz ogniwa, siły, która z kolei jest bezpośrednią przyczyną różnicy potencjałów pomiędzy obiema płytkami.

Wielkość tej siły elektromotorycznej nie zależy zupełnie ani od wielkości płytek, ani od ilości wlanego elektrolitu, ani też od

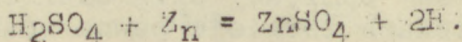
OGNIWA PIERWOTNE I WTORNE.

R o z d z i a ł 1.

Ogniwa pierwotne.

Zasada działania ogniw. Jednym ze sposobów wytwarzania siły elektromotorycznej jest jej otrzymywanie na drodze procesów elektrochemicznych.

Jeżeli zanurzymy dwa różne metale, np. miedź /Cu/ i cynk /Zn/ w roztworze kwasu siarkowego /H₂SO₄/, to kwas siarkowy, działając na cynk, spowoduje powstanie siarczanu cynku /ZnSO₄/ i wodoru /2H/. Proces ten możemy wyrazić wzorem chemicznym:



Podczas całego tego procesu zachodzić będzie znane już nam skądinąd zjawisko jonizacji. Reakcja chemiczna, zachodząca pomiędzy kwasem siarkowym a cynkiem, spowoduje ujemne naładowanie się płytki cynkowej. Druga płytka, miedziana, zostanie wskutek przemian elektrochemicznych w całym tym zespole naładowana dodatnio. Jeżeli obu tych płytek nie połączymy na zewnątrz żadnym przewodnikiem prądu elektrycznego, płytki te naładowują się tylko do pewnej wartości, dając nam w ten sposób pewną różnicę potencjałów. Różnica ta powstaje zatem wskutek procesów elektrochemicznych, zachodzących wewnątrz tego zespołu, który nazywamy ogniwem. Te procesy elektrochemiczne wywołują powstanie siły elektromotorycznej wewnątrz ogniwa, siły, która z kolei jest bezpośrednią przyczyną różnicy potencjałów pomiędzy obiema płytkami.

Wielkość tej siły elektromotorycznej nie zależy zupełnie ani od wielkości płytek, ani od ilości wlanego elektrolitu, ani też od

czasokresu zanurzenia w nim płytek, lecz wyłącznie od rodzaju ciał użytych do jej wytorzenia na drodze przemian elektrochemicznych. Siła ta powstaje kosztem zużywania się cynku, co łatwo sprawdzić można, zważwszy płytkę cynkową przed zanurzeniem i po wyjęciu, po pewnym czasie, gdyżmy już tę siłę elektromotoryczną użyli do spowodowania przepływu prądu przez jakiś przewodnik.

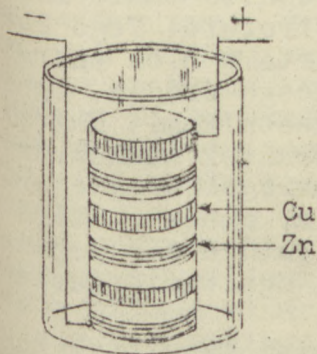
Gdy obie te płytki połączymy na zewnątrz jakimś przewodnikiem, przepłynie przezeń prąd, a różnica potencjałów pomiędzy obiema płytkami zmaleje, bo prąd ten będzie płynął zarówno przez obwód zewnętrzny, jak i wewnętrzny, pokonywując opór, jaki stawiają jego przepływowi same płytki oraz elektrolit. W miarę stopniowego zużywania się płytki cynkowej, pokrywa się ona coraz to grubszą warstwą siarczynu cynku i w ten sposób opór wewnątrz ogniwa, zwany oporem wewnętrznym, stale wzrasta.

Mówiliśmy już o tym, że pomiędzy siłą elektromotoryczną źródła a napięciem na jego zaciskach istnieje pewna różnica, równa spadkowi napięcia na oporze wewnętrznym samego źródła. W miarę zużywania się ogniwa, tj. właściwie samej płytki cynkowej, jego siła elektromotoryczna, która jest wielkością stałą, bynajmniej nie maleje. Maleje tylko napięcie na zaciskach ogniwa wskutek wzrostu jego oporu wewnętrznego w miarę stopniowego jego zużywania się. Jeżeli w obwodzie zewnętrznym żaden prąd nie płynie, to jednak, chociaż znacznie wolniej, kwas działa na cynk w dalszym ciągu. Tym się tłumaczy, że ogniwo, nawet nie używane, po pewnym czasie uważane jest za "zużyte".

Jak więc widzimy, ogniwo każde scharakteryzować możemy przez podanie jego siły elektromotorycznej i oporu wewnętrznego.

2. Stos Volty. Ogniwo istnieje cały szereg typów, wszystkie one jednak opierają się na zasadzie działania najprostszego ogniwa - ogniwa Volty. Ogniwo takie składa się z krążka miedzianego i cynkowego, oddzielonych od siebie krążkiem bibuły, przesiąkniętej kwasem siarkowym.

Szereg takich krążków, ułożonych naprzemiennie jeden na drugim, tworzy tzw. stos Volty /rys.59/. Ogniwo to podane zostało tutaj jako prototyp nowoczesnych ogniw, obecnie jednak nie ma ono żadnego praktycznego zastosowania. Jak już zaznaczyliśmy, istnieje cały szereg typów ogniw, najpowszechniej stosowane jednak jest ogniwo typu Leclanché.



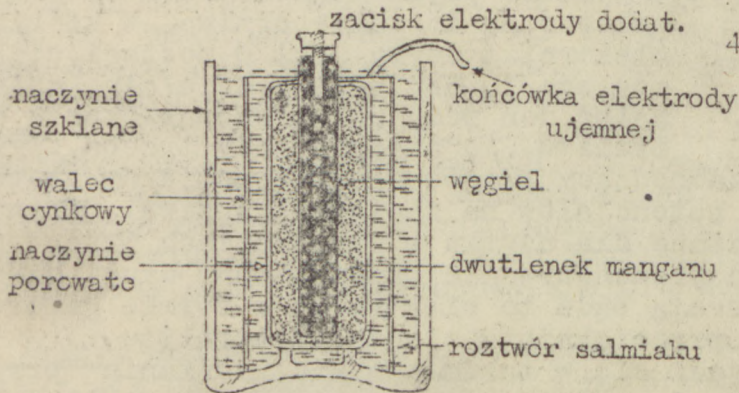
Rys.59. Stos Volty.

3. Rodzaje ogniw. Ze względu na postać użytego elektrolitu, ogniwa podzielić można na mokre, sucho-mokre czyli nalewne i suche. Ogniwa mokre są to takie ogniwa, w których elektrolit użyty jest w postaci płynu. Ogniwa sucho-mokre czyli nalewne są to takie ogniwa, w których elektrolit użyty jest w postaci ciała stałego i, aby ogniwo działało, należy stąłego i, aby ogniwo działało, należy należa doń wody celem rozpuszczenia elektrolitu. Po nalaniu wody trzeba zwykle

jakis czas odczekać, aż zachodzący proces elektrochemiczny spowoduje powstanie pewnej różnicy potencjałów na zaciskach ogniwa. Ogniwa tego rodzaju są bardzo wskazane dla użytku w urządzeniach przenośnych ze względu na łatwość ich przechowywania przez bardzo długi okres czasu: Ogniwa suche zawierają bądź to elektrolit w formie gąsaretowatej, bądź też trociny, przesiąknięte cieczą elektrolitu.

Gdy cały cynk, znajdujący się w takim ogniwie, zostanie "przeżarty" przez kwas, ogniwo to nie nadaje się już więcej do użytku. Dla

uruchomienia takiego ogniwa nie musimy stosować żadnych pomocniczych procesów elektrycznych. Istnieją poza tym ogniwa, dla których uruchomienia trzeba przedtem użyć energii elektrycznej z obcego źródła, czyli, jak się to mówi, trzeba je naładować, zanim będą one gotowe do użytku. Po wyczerpaniu całego zasobu energii elektrycznej, zawartej w takim ogniwie, czyli po wyładowaniu się jego, ogniwo takie można naładować powtórnie i powtarzać ten proces wielokrotnie. Tego rodzaju ogniwa nazywamy ogniwami wtórnymi, ponieważ zawarta w nich energia elektryczna pochodzi nie z samego ogniwa, a z obcego źródła. Ogniwa wtórne nazywają się również akumulatorami lub zasobnikami. Natomiast ogniwa, w których energia elektryczna powstaje wskutek wewnętrznych procesów chemicznych, bez konieczności użycia jakiegoś drugiego źródła siły elektromotorycznej celem jego naładowania, ogniwa, które zużywają wraz z zużyciem ich części składowych i które się regenerują czyli powtórnie ładować nie dadzą - nazywamy ogniwami pierwotnymi.

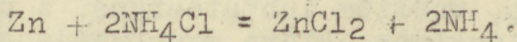


Rys.60. Mokre ogniwo typu Leclanché.

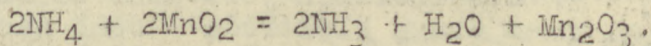
4. Ogniwo typu Leclanché
Ogniwo typu Leclanché jest ogniwem pierwotnym. Używane jest ono w trzech jakiejś formie: mokrej, nalewnej i suchej. Ogniwo mokre składa się ze szklanego naczynia, w którym zanurzone są dwie elektrody: cynkowa, w kształcie walca z blaszki i węglowa, w kształcie pałeczki /rys.60/.

Elektroda cynkowa jest elektrodą ujemną, a elektroda węglowa - dodatnią. Jako elektrolit użyty jest roztwór chlorku amonu czyli salmiak NH_4Cl .

Zachodzący proces elektrochemiczny da się wyrazić wzorem:



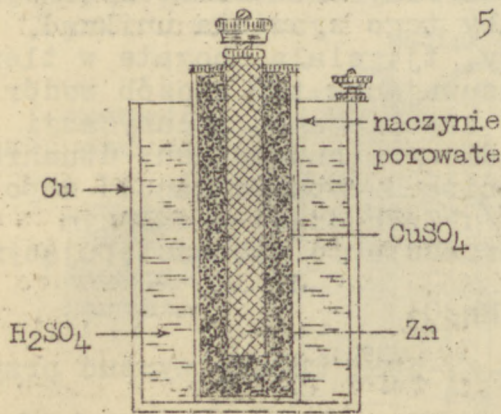
Wodór, zawarty w znacznej ilości w grupie NH_4 , mógłby osiadać na węglowej, zmniejszając w ten sposób jej powierzchnię czynną, jak później zobaczymy, ma wpływ na "długotrwałość" ogniwa. Osiedlając na węglu, wodór utworzyłby jak gdyby nową zupełnie elektrodę, której biegunowość w stosunku do cynku byłaby ujemna. Pomiędzy wodorem a cynkiem powstałaby więc teraz w ogniwie siła elektromotoryczna o kierunku przeciwnym do poprzedniego. Z tego też względu siłę tę nazywa się siłą przeciwelektromotoryczną. Cały ten proces znany jest pod nazwą polaryzacji ogniwa. Jasne jest, że polaryzacja jest zjawiskiem szkodliwym, bo redukuje wielkość siły elektromotorycznej pomiędzy obiema właściwymi elektrodami. Aby tego zjawiska uniknąć, stosuje się w ogniwach tzw. depolaryzatory, tj. ciała, bogate w tlen, łącząc się z wodorem, daje wodę, usuwając w ten sposób wodór z powierzchni elektrody dodatniej, a więc zapobiegając polaryzacji ogniwa. Jako depolaryzatorów używa się nadmanganianu potasu, dwuchromianu potasu, dwutlenku manganu itp. W ogniwach typu Leclanché depolaryzátorem jest dwutlenek manganu MnO_2 . Zachodzące w dalszym ciągu reakcje chemiczne w ogniwie dadzą przedstawić się następującym wzorem:



Tym się też tłumaczy zapach amoniaku NH_3 , jaki możemy wyczuć przy badaniu zużytych ogniw typu Leclanché. Ogniwo suche zawiera te same składniki, co i ogniwo mokre, tylko że elektrolitem przesiąknięte są trociny, wypełniające wewnętrzną

przestrzeni międzyelektrodową, to też nie ma obawy o wylanie się elektrolitu. Czasami używa się elektrolitu w formie masy galaretowatej. Zamiast szklanego naczynia stosuje się naczynie z blachy cynkowej, wytłoczone w formie walca i stanowiące jednocześnie elektrodę ujemną ogniwa. Całość zalana jest smolą, woskiem lub stearyną, z umieszczoną czasami w tej masie rurką szklaną, którą wydobywają się resztki gazów, powstających w ogniwie podczas przebiegu procesów chemicznych.

Ogniwo nalewne zbudowane jest identycznie, jak i ogniwo suche, elektrolit użyty jest w formie krystalicznej i żadne reakcje nie zachodzą, dopóki przez specjalnie wyprowadzony na zewnątrz wlot nie wlejemy wody, w której sól ta się rozpuści. Ogniwo takie może być przechowywane przed użyciem przez długi okres czasu. Po wlaniu wody trzeba zwykle pewien czas odczekać, aż zajdą początkowe reakcje elektrochemiczne i ogniwo będzie gotowe do użytku.

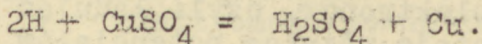


Rys. 61.

Ogniwo Menotti-Daniella.

5. Ogniwo Menotti-Daniella. Ogniwo Menotti-Daniella składa się z naczynia miedzianego, w którym umieszczony jest pręt cynkowy, otoczony walcem z porowatego materiału /rys. 61/. Przestrzeń pomiędzy naczyniem porowatym a elektrodą cynkową wypełniona jest siarczanem miedzi $CuSO_4$ działającym jako depclaryzator w ogniwie. Elektroliten jest kwas siarkowy H_2SO_4 a drugą elektrodą - samo naczynie miedziane /Cu/. Kwas siarkowy, działając na cynk, tworzy siarczan cynku $ZnSO_4$ i wodór $2H$. Wodór, przechodząc przez siarczan miedzi, łączy się z nim, dając na powrót kwas siarkowy i wytrącając miedź.

osiada na zewnętrznym naczyniu. Proces ten może być przedstawiany następującym równaniem chemicznym:



Siła elektromotoryczna tego ogniwa wynosi około 1,1 V., a opór wewnętrzny zależy od jego rozmiarów.

Elektronowe uzasadnienie powstawania siły elektromotorycznej w ogniwie.

Jeżeli weźmiemy przykładowo ogniwo typu Menotti-Daniella i zbadamy pierwiastki chemiczne, w skład jego wchodzące, oraz ich liczby atomowe, to otrzymamy następujące rezultaty: wodór - 1, tlen - 8, siarka - 16, miedź - 29 i cynk - 30. Po obliczeniu elektronów, wirujących w niekompletnych powłokach orbit elektronowych w tych atomach, otrzymamy: wodór - 1, tlen - 6, siarka 6, miedź - 11 i cynk - 12. W kwasie siarkowym mamy zatem następującą ilość elektronów, wirujących w niekompletnych powłokach orbit w poszczególnych składnikach:

- H₂ - 2 x 1 elektronów,
- S - 6 "
- O₄ - 4 x 6 "

połączeniu się ze sobą tych pierwiastków, 2 elektrony wodoru i 6 elektronów siarki uzupełni zewnętrzne powłoki każdego z atomów tlenu ośmiu elektronów, a więc powłoki te będą teraz kompletne. Gdy w ogniwie zajdzie dysocjacja elektrolitu, cząsteczka kwasu siarkowego rozpadnie się na jon dodatni H₂ i jon ujemny SO₄. Cynk, który wejdzie w miejsce wodoru, łącząc się z jonem SO₄, będzie musiał, dla podtrzymania równowagi elektronowej, pozbyć się dwóch elektronów, które zostały grupie SO₄ pozostawione przez dwa atomy wodoru. Elektrony te pozostają zatem na elektrodzie cynkowej, ładując ją ujemnie.

Natomiast cząsteczka wodoru $/H_2/$ dąży do elektrody miedzianej, z tego zabiera dwa elektrony, zubożając się i pozostawiając na elektrodzie miedzianej niedomiar elektronów, czyli ładując ją dodatnio.

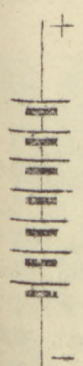
W ten sposób w ogniwie powstaje różnica potencjałów na elektrodach. Oczywiście jest, że wyżej opisany proces zachodzić będzie tylko do momentu "nasylenia elektronowego" elektrod. To też ciągły proces ładowania elektrod możliwy jest tylko przy przepływie prądu, który niweluje różnicę potencjałów na obu elektrodach ogniwa.

Podobnie wyprowadzić można powstawanie różnicy potencjałów na elektrodach ogniwa dowolnego typu.

7. Pojemność ogniwa. Dla całkowitego scharakteryzowania ogniwa nie wystarczy podanie jego siły elektromotorycznej i oporności wewnętrznej. Interesuje nas poza tym kwestia, na jak długi okres czasu ogniwo wystarczy. Cechę tę określamy mianem pojemności ogniwa. Ponieważ trwałość ogniwa zależy od wielkości prądu czerpanego, jasne jest, że im prąd czerpany będzie mniejszy, tym ogniwo wystarczy na czas dłuższy. Pojemność ogniwa jest natomiast cechą względnie stałą i mierzy się iloczynem prądu przez czas, w jakim ten prąd z ogniwa czerpiemy. Wynika z tego, że pojemność ogniwa można byłoby mierzyć w Kulombach $/bo It = Q/$, praktycznie jednak mierzymy pojemność w amperogodzinach $/Ah/$. Pojemność ogniwa jest tym większa, im powierzchnia czynna elektrody jest większa. Ogniwo o większej pojemności ma zatem z reguły większe rozmiary.

8. Łączenie ogniw w baterie. Ogniwa łączyć możemy w baterie. Istnieją trzy sposoby łączenia ogniw: równoległy, szeregowy i mieszany. W zależności od rodzaju połączenia zmieni się siła elektromotoryczna i opór wewnętrzny całej baterii.

Gdy szereg /n/ ogniw połączymy ze sobą tak, że biegun dodatni jednego ogniwa połączymy z bieguncem ujemnym następnego ogniwa itd., otrzymamy baterię ogniw, połączonych szeregowo /rys.62/. Jeżeli siłę elektromotoryczną jednego ogniwa określimy przez E, a jego opór wewnętrzny przez r, to w takiej baterii



siła elektromotoryczna całkowita $E_c = nE$,
a całkowita oporność wewnętrzna $r_c = nr$.

A więc, z prawa Ohma, w obwodzie będzie płynął prąd

$$I = \frac{nE}{R + nr},$$

gdzie przez R oznaczamy opór zewnętrzny.

Jeżeli szereg /m/ ogniw połączymy tak, że biegun dodatni jednego ogniwa połączymy z bieguncem dodatnim następnego ogniwa itd., a bieguny ujemne tych ogniw również ze sobą połączymy, to otrzymamy w rezultacie jakgdyby jedno ogniwo o większych elektrodach, a więc siła elektromotoryczna w tym wypadku się nie zmieni, zwiększy się natomiast pojemność baterii wskutek zwiększenia się powierzchni

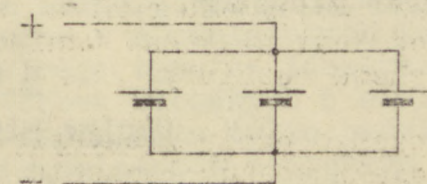
Rys.62. Schemat baterii ogniw, połączonych szeregowo.

czynnej elektrod oraz zmniejszy się jej opór wewnętrzny, bo ogory wewnętrzne poszczególnych ogniw zostały w ten sposób jakgdyby połączone równolegle. A więc w takiej baterii

$$E_c = E, \text{ a } r_c = \frac{r}{m}.$$

Taki sposób łączenia ogniw nazywamy połączeniem równoległym /rys.63/.

Jeżeli teraz m gałęzi po n ogniw, połączonych ze sobą szeregowo, połączymy równolegle, to opór każdej gałęzi wyniesie



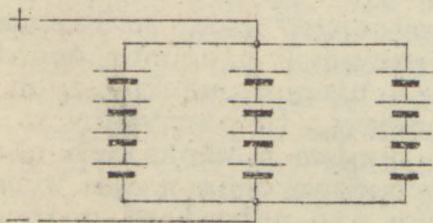
Rys.63. Schemat baterii ogniw, połączonych równolegle.

nr omów. Wskutek równoległego połączenia m takich gałęzi, opór całkowity baterii wyniesie nr/m omów. Całkowita siła elektromotoryczna wyniesie nE woltów, a więc prąd, płynący w obwodzie,

$$R = \frac{nE}{R + \frac{nr}{m}}$$

Takie połączenie ogniw nazywamy połączeniem mieszanym /rys. 64/. Jeżeli przy połączeniu szeregowym ogniw R jest duże w porównaniu z r , to prąd w obwodzie jest w przybliżeniu wprost proporcjonalny do n , czyli

do ilości ogniw, połączonych szeregowo. Jeżeli natomiast r jest duże w porównaniu z R , to zwiększenie ilości połączonych ogniw mało wpłynie na wzrost prądu w obwodzie. Całkowita bowiem siła elektromotoryczna wzrośnie co prawda, ale wzrośnie zarazem i całkowity opór wewnętrzny baterii. W takich właśnie wypadkach należy stosować połączenie mieszane celem zredukowania oporu wewnętrznego źródła



Rys. 64. Schemat baterii ogniw, połączonych w sposób mieszany.

R o z d z i a ł 2.

Ogniwa wtórne czyli akumulatory.

1. Opis ogólny akumulatorów kwasowych. Akumulatory czyli zasobniki porządzić można ze względu na użyty w nich elektrolit na akumulatory kwasowe i ługowe czyli zasadowe. Akumulatory kwasowe, jako powszechniej używane, zostaną omówione najpierw. Tak jak i ogniwa, akumulate

ór ca kwasowe podzielić można na mokre i nalewne. W akumulatorach mokrych kwas siarkowy / H_2SO_4 / użyty jest w postaci płynu, podczas gdy w akumulatorach nalewnych kwas otrzymujemy przez nalanie wody, rozpuszczającej pewne sole kwasu siarkowego, przed procesem ładowania, po naładowaniu natomiast woda zostaje wylana i akumulator używany jest jako akumulator suchy. Niektóre typy akumulatorów zawierają elektrolit w postaci niewylewnej masy galaretowatej. Akumulatory tego typu mają szereg zalet: są niewylewne, wykazują małe samowyladowanie się i mogą mieć mniejsze rozmiary, niż akumulatory z elektrolitem w postaci cieczy; mają one jednak gorsze właściwości elektryczne i sprawiają trudności w konserwacji i ładowaniu.



Niewyléwność, która jest bardzo ważną cechą akumulatora przenośnego, zapewniona jest w wojskowych akumulatorach w nieco inny sposób, a mianowicie przez użycie tzw. korków labiryntowych, skonstruowanych tak, że w każdym położeniu elektrolitu zapewniają swobodne ujście gazom, a zapobiegają wylaniu się samego elektrolitu płynnego, niezależnie od położenia akumulatora /rys.65/.

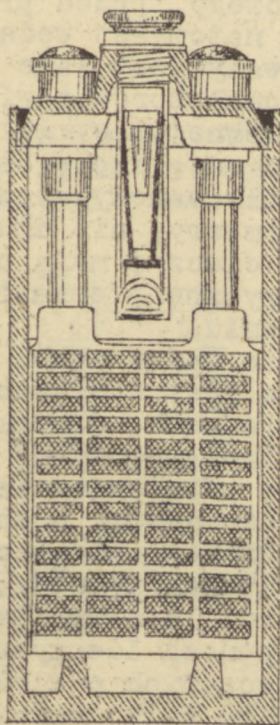
Rys. 65. Korek labiryntowy.

Procesy elektrochemiczne w akumulatorach kwasowych niewylewnych dowolnego typu są identyczne, co i w akumulatorach niezabezpieczonych o elektrolitem w formie cieczy. Z tego względu zajmiemy się tu tylko omówieniem reakcji elektrochemicznych i budowy akumulatorów z ciekłym kwasem siarkowym.

licie w formie cieczy. Z tego względu zajmiemy się tu tylko omówieniem reakcji elektrochemicznych i budowy akumulatorów z ciekłym kwasem siarkowym.

2. Budowa i zasada działania akumulatorów kwasowych. Najprostszy akumulator składa się z dwóch płyt ołowianych, zanurzonych w roztworze kwasu siarkowego. Płyty te stanowią elektrody, a kwas siarkowy -

- elektrolit /rys.66/. Po zanurzeniu elektrody pokrywają się po krótkim czasie cienką warstwą siarczanu ołowiu / $PbSO_4$ /.



Jeżeli dołączymy elektrody do źródła siły elektromotorycznej stałej i przepuścimy przez akumulator prąd, to stwierdzimy, że natężenie tego prądu będzie stopniowo maleć do pewnej stałej wartości; zmniejszanie się prądu jest spowodowane powstaniem w akumulatorze siły elektromotorycznej o kierunku przeciwnym, czyli siły przeciwelektromotorycznej, stopniowo rosnącej do pewnej określonej wielkości. Równocześnie na elektrodzie dodatniej, tzn. na płycie, połączonej z biegunem dodatnim źródła, warstwa siarczanu ołowiu zamienia się na brązową natną warstwę dwutlenku ołowiu, zaś na elektrodzie ujemnej, tzn. na płycie, połączonej z biegunem ujemnym źródła, warstwa siarczanu ołowiu ustępuje, pozostawiając czysty ołów gąbczasty. Obydwie elektrody się zróżnicowują. Od tej chwili natężenie prądu przybrało wartość stałą i z elektrolitu zaczynają się wydzielają pęcherzyki gazu. Są to pęcherzyki tlenu i wodoru, które wskazują, że woda w płynie się rozkłada.

Rys.66. Przekrój akumulatora.

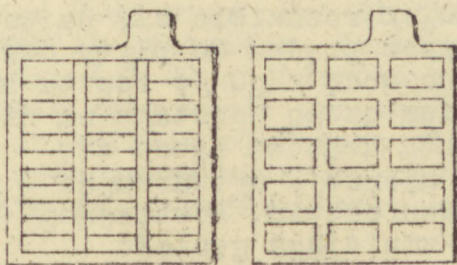
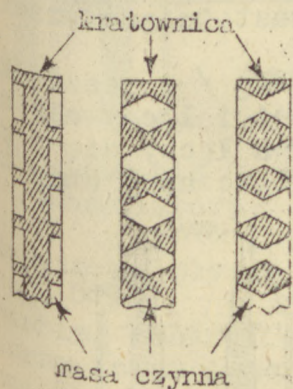
Prąd, płynący przez akumulator, jest to

ładowania. Akumulator, ładując się, jest odbiornikiem energii elektrycznej. Po wystąpieniu gazowania prąd ładowania przerywamy. Stwierdzimy wtedy, że między elektrodami mamy różnicę potencjałów około 1,1 wolta. Akumulator może być teraz użyty jako źródło energii elektrycznej. W obwodzie, dołączonym do akumulatora, płynie prąd, zwany prądem wyładowania, o kierunku przeciwnym do prądu ładowania. Gdy prąd wyładowania spadnie do zera, obie elektrody będą pokryte, jak poprzednio, warstwą siarczanu ołowiu. Obie elektrody się ujednostajniły.

Sformowanie płyt. Przez wielokrotne ładowanie i wyładowanie zewnętrzna warstwa na płytach, którą nazywamy warstwą czynną /dodatnią lub ujemną/, staje się coraz grubsza, a prądy ładowania i wyładowania trwają

coraz dłużej. Coraz więcej energii elektrycznej przetwarza się w energię chemiczną; mówimy, że pojemność akumulatora wzrasta.

Metoda wielokrotnego ładowania i wyładowania akumulatora w celu utworzenia na jego płytach warstwy czynnej, czyli w celu



Rys. 67. Przekroje płyt.

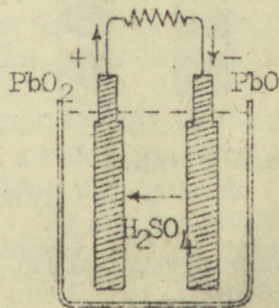
tw. sformowania płyt, nazywa się metodą Planté. Metoda ta zapewnia doskonałe wyniki, lecz jest kosztowna, a ponadto płyty, wykonane z czystego ołowiu, są ciężkie.

Inny sposób przygotowania płyt akumulatorów polega na wypełnieniu specjalnymi masami czynnymi wyżłobień lub oczek, wykonanych w płytach ołowianych, zwanych w takim wypadku kratownicami; są to tzw. płyty masowe. Płyty dodatnie wypełnione są minią z domieszką glejty, a ujemne - glejtą z domieszką minii /rys.67/. Po pierwszym ładowaniu w masie czynnej płyty dodatniej powstaje dwutlenek ołowiu PbO_2 , a w masie płyty ujemnej - ołów gąbczasty Pb . Po kilku załadunkach i wyładunkach proces formowania płyt jest zakończony. Ta metoda przygotowania płyt nazywa się metodą Faure, pochłania ona mniej czasu, jest tańsza od poprzedniej, ponadto płyty są lżejsze ale mniej trwałe.

4. Procesy elektrochemiczne przy ładowaniu i wyładunku akumulatora.

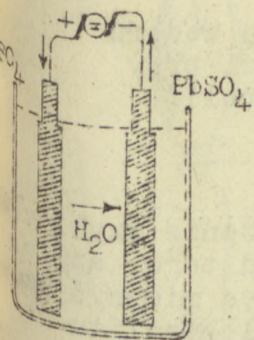
Podczas wyładowania w akumulatorze odbywają się następujące przemiany chemiczne:

Kwas siarkowy H_2SO_4 rozdziela się na wodór H_2 i resztę siarkową SO_4 . Wodór łączy się z prądem do płyty dodatniej i łączy się z jej tlenem O , tworząc wodę H_2O ; reszta kwasowa łączy się z ołowiem tej płyty, skutkiem czego powstaje na niej siarczan ołowiu - $PbSO_4$ /rys.68/. Reszta kwasowa łączy się także z ołowiem płyty ujemnej, wytwarzając na niej również siarczan ołowiu. Powstająca skutkiem reakcji woda zmniejsza gęstość elektrolitu. Gdy masa czynna płyt całkowicie zamienia się na siarczan ołowiu, prąd przestaje płynąć, gdyż płyty są wtedy jednakowe; aby prąd płynął, płyty muszą być różne. W praktyce jednak wyładowanie zostaje zwykle przerwane, zanim płyty zamienią się całkowicie na siarczan ołowiu. Siarczan ołowiu, pokrywając stopniowo płyty,



Rys. 68. Wyładowanie akumulatora

Przednia przenikanie kwasu do masy czynnej, skutkiem czego reakcje elektrochemiczne stają się mniej energiczne. Tak wiemy, podczas ładowania zostaje przez akumulator przepuszczony prąd w kierunku odwrotnym do prądu wyładowania; skutkiem tego reakcje elektrochemiczne zostają w akumulatorze odwrócone /rys.69/, tzn.

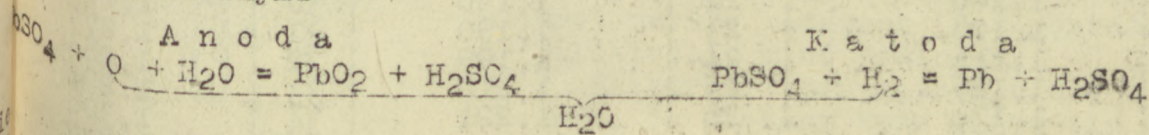


siarczan ołowiu płyty dodatniej zostaje rozdzielony na ołów i resztę kwasową; ołów łączy się z tlenem, który powstaje skutkiem rozłożenia się wody pod wpływem przepływającego prądu i który dąży do płyty dodatniej; dzięki temu płyta dodatnia pokrywa się dwutlenkiem ołowiu. Płyta ujemna również traci resztę kwasową, przetwarzając się w ołów gąbczasty. Reszty kwasowe obu płyt łączą się z wodorem, który powstaje z rozłożenia wody, tworząc kwas siarkowy. Skutkiem powstawania kwasu elektrolit gęstnieje. Reakcje elektrochemiczne zachodzą tak długo, dopóki siarczan ołowiu nie zostanie całkowicie przekształcony.

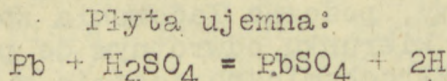
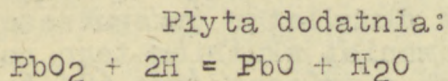
rys.69. Ładowanie akumulatora.

Po zniknięciu siarczanu ołowiu z płyt następuje energiczny rozkład wody na tlen, który wydziela się na płycie dodatniej, i wodór, który wydziela się na płycie ujemnej.

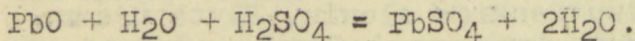
Przebieg reakcji elektrochemicznych podczas formowania płyt w akumulatorze /oraz jego ładowania/ może być przedstawiony następującymi reakcjami chemicznymi:



Podczas rozładowania akumulatora reakcje zachodzą w nieco bardziej skomplikowany sposób:



/Strzałka wskazuje kierunek przepływu jonu wodoru podczas procesu elektrolizy, jaki zachodzi przy przepływie prądu wyładowania przez elektrolit w akumulatorze/.



Z tych procesów elektrochemicznych wynika, że stężenie czyli gęstość elektrolitu zmienia się znacznie w zależności od tego, czy akumulator jest naładowany, czy rozładowany. Można by więc mierzyć stopień naładowania akumulatora przez pomiar gęstości elektrolitu.

5. Gęstość elektrolitu. Gęstość elektrolitu mierzy się albo jego ciężarem właściwym, albo w stopniach Baumé.

Poniższa tabelka daje nam porównanie stopni Baumé /°B/ z ciężarem właściwym:

°B	Ciężar właściwy	°B	Ciężar właściwy	°B	Ciężar właściwy
10	1,075	19	1,152	27	1,231
11	1,083	20	1,161	28	1,242
12	1,091	21	1,171	29	1,252
13	1,100	22	1,180	30	1,263
14	1,108	23	1,190	31	1,275
15	1,116	24	1,199	32	1,286
16	1,125	25	1,210	33	1,296
17	1,134	26	1,221	34	1,308
18	1,143			35	1,320

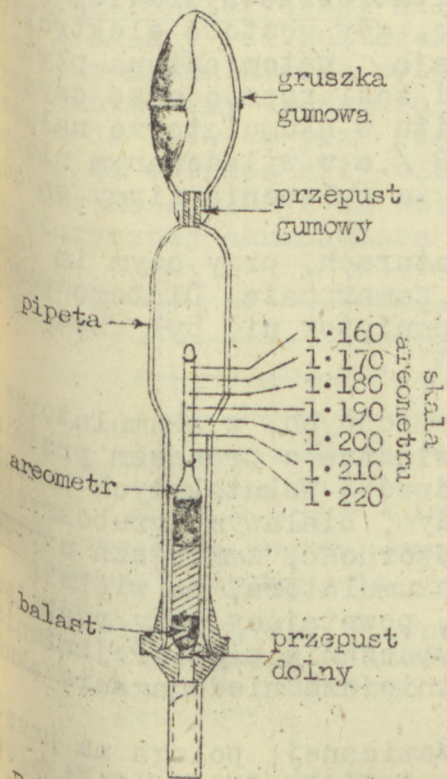
Do pomiaru gęstości elektrolitu służy przyrząd, zwany areometrem lub kwasomierzem. Składa się on z zanurzonej rurki szklanej, rozszerzonej na jednym końcu. Wewnątrz grubszej części umieszczony jest balast czyli obciążenie /np. śrut /, a w cieńszej znajduje się skala z podziałem na stopnie Baumé lub ciężar właściwy.

Dla pomiaru gęstości areometr zanurza się w płynie, w którym, dzięki obciążeniu, utrzymuje się on w położeniu pionowym. Głębokość zanurzenia areometru zależy od gęstości cieczy, a wskazania na podziałce odczytuje się przy powierzchni cieczy.

Ze względów praktycznych często umieszcza się areometr w pipecie, tj. rurce szklanej, zaopatrzonej w gruszkę gumową na jednym końcu i cieńszą rurkę gumową - na drugim. Pipeta służy do wysysania z akumulatora niezbędnej dla pomiaru ilości elektrolitu /rys.70/.

Gęstość elektrolitu zmienia się o około 0,002 na każde 30C /50F /. Poprawkę tę należy zawsze wnieść do pomiaru, o ile dokonany on został w temperaturze odmienniej od 150C /ok.600F /, dla której zwykle podawana jest gęstość, jaką elektrolit mieć powinien.

Elektrolit przygotowuje się w ten sposób, że stężony kwas wlewa się do wody destylowanej, a nie odwrotnie, gdyż



Rys.70. Areometr.

wlewaniu wody do kwasu wywołuje burzenie się elektrolitu i wypryskiwanie.

Elektrolit w akumulatorze naładowanym powinien zawierać taką ilość kwasu siarkowego, aby część kwasu, pozostała przy końcu wyładowania, była wystarczająca dla umożliwienia przebiegu reakcji chemicznych i zapewnienia dostatecznej przewodności elektrolitu. Z drugiej strony siła elektromotoryczna akumulatora wzrasta, gdy gęstość elektrolitu jest większa; zbyt stężone roztwory działają natomiast na płyty nawet przy otwartym obwodzie zewnętrznym i zasiarzczają masę czynną.

Z powyższych względów gęstość elektrolitu w akumulatorze naładowanym nie powinna przekraczać $1,300 / \text{ok. } 33^{\circ}\text{B} /$, a w wyładowanym nie powinna być mniejsza od $1,100 / 13^{\circ}\text{B} /$, chyba że zalecenia firmy są odmienne.

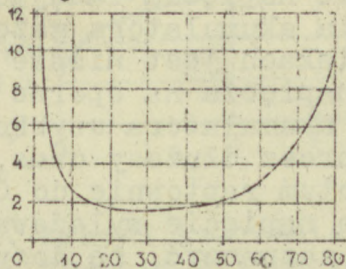
Elektrolit zamarza przy niskich temperaturach, przy czym im jest gęstszy, tym niższa jest jego temperatura zamarzania. Dlatego podczas mrozów zwracać należy uwagę na to, aby akumulator nie był zbyt długo wyładowany.

6. Reakcje poboczne. Oprócz reakcji elektrochemicznych, w akumulatorze zachodzą reakcje poboczne, chemiczne, niezwiązane z procesem przemiany energii elektrycznej w chemiczną i naodwrot. Wskutek tych pobocznych reakcji elektrody pokrywają się twardym, białawym, grubokryształycznym siarczanem ołowiu, który ma dużą oporność, zmniejsza użyteczną masę czynną, a tym samym pojemność akumulatora, ma większą objętość, niż siarczan drobnokryształiczny, powstający przy reakcjach elektrochemicznych, i przyczynia się do wypaczania płyt. Pojawienie się tego siarczanu ołowiu stanowi najpoważniejsze niedomaganie akumulatora, zwane zasiarczeniem.

Inna reakcja poboczna, natury elektrochemicznej, polega na przekształcaniu się dwutlenku ołowiu naładowanej płyty dodatniej i ołowiu gąbczastego naładowanej płyty ujemnej przy jednoczesnym osłabieniu elektrolitu; w wyniku, akumulator stopniowo wyładowuje się na drobny.

chemicznej, a płyty pokrywają się siarczanem ołowiu, mimo że nie ma procesu zamkniętego. Proces ten nazywa się samowyladowaniem się akumulatora.

Sila elektromotoryczna. Siła elektromotoryczna akumulatora nie jest liniowa i zależy od gęstości elektrolitu. Waha się ona w granicach od 2,1 V. w akumulatorze wyladowanym do 2,4 - 2,6 V. w akumulatorze naładowanym. Przy ładowaniu siła elektromotoryczna akumulatora szybko rośnie do 2 V., a przy rozładowaniu - szybko opada do 2,1 - 2 V. Wynika z tego, że różnica siły elektromotorycznej akumulatora jest nieznaczna i nie może służyć za wskaźnik jego naładowania. Wielkość siły elektromotorycznej akumulatora ze względu na jego mały opór wewnętrzny ma znaczenie raczej teoretyczne; w praktyce przyjmuje się pod uwagę wyłącznie napięcie na jego zaciskach podczas ładowania lub wyladowania.

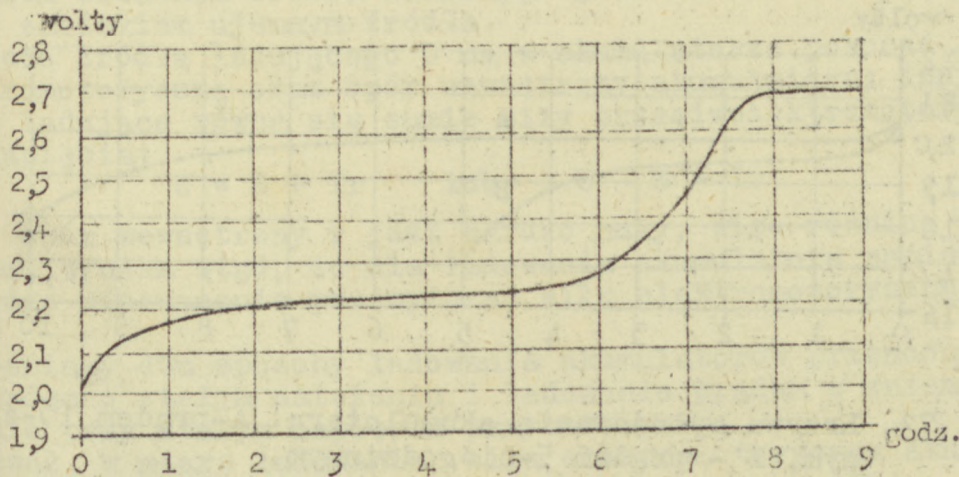


Wykres zmiany oporności w zależności od jego gęstości.

8. Opór wewnętrzny. Opór wewnętrzny akumulatora jest stosunkowo bardzo mały i wynosi od jednej lub mniej tysięcznych do kilku setnych oma, dlatego też zwieranie jego zacisków jest niedopuszczalne, bo przy zwarciu płynie przez akumulator bardzo duży prąd, który go niszczy. Największą część oporu wewnętrznego przypada na opór elektrolitu, który zależy od jego gęstości; jest on najmniej przy gęstości około 1,242/28⁰B/i

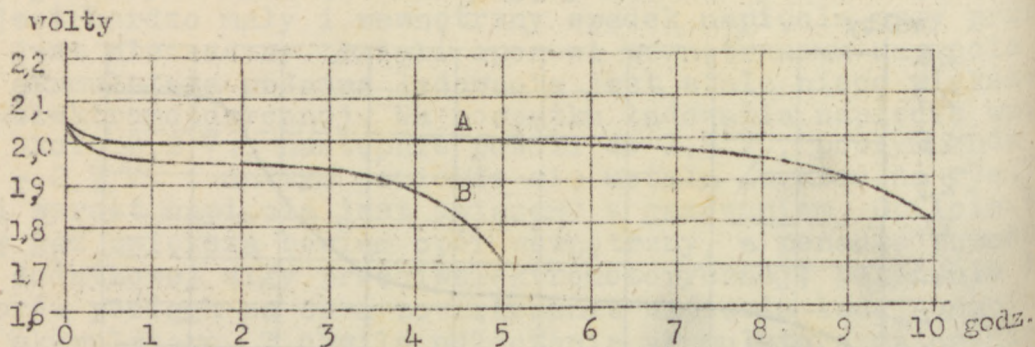
nie w miarę rozrzedzania lub zagęszczania się elektrolitu /wykres rys. 71/.

9. Napięcie na zaciskach. Napięcie na zaciskach akumulatora mało się różni od jego siły elektromotorycznej, ponieważ opór wewnętrzny akumulatora jest bardzo mały i wewnętrzny spadek napięcia przy przepływie prądu jest nieznaczny. Dzięki oporowi wewnętrznemu napięcie na zaciskach akumulatora podczas ładowania jest stale nieco większe od jego siły elektromotorycznej. Na początku ładowania napięcie wzrasta szybko do około 2,2 V., następnie powoli do 2,3 V., poczym znów szybko do 2,6 - 2,7 V. i na tym poziomie się ustala /wykres na rys. 72/. Ten szybki wzrost napięcia jest związany z gazowaniem. Obficie wydobywający się gaz zwiększa bowiem opór wewnętrzny, a ponadto powoduje powstanie dodatkowej siły przeciwelektromotorycznej; pokonanie tych nowych oporów pociąga za sobą powiększenie napięcia ładującego na zaciskach akumulatora. Z chwilą odłączenia akumulatora gazowanie ustaje. Przy wyładowaniu napięcie na zaciskach jest niższe od siły elektromotorycznej akumulatora o spadek napięcia na oporze wewnętrznym. Na początku wyładowania napięcie akumulatora szybko spada do 2 V. i na tym poziomie utrzymuje się przez dłuższy czas, opada następnie łagodnie do około 1,85 V., a potem raptownie do 0 V. /wykres na rys. 73 /. Ogółem jednak za średnie napięcie wyładowania przyjmuje się w praktyce napięcie 2 V. Należy zaznaczyć, że dozwoloną granicą wyładowania akumulatora kwasowego jest napięcie 1,85 V.
10. Pojemność użyteczna. Pojemność użyteczna akumulatora jest to ilość elektryczności, którą daje zupełnie naładowany akumulator, jeżeli zostaje wyładowany równomiernym prądem w sposób ciągły do dozwolonej granicy wyładowania. Pojemność akumulatora wyraża się w amperogodzinach /Ah /; obliczamy ją, mnożąc prąd wyładowania w amperach przez czas wyładowania w godzinach. Pojemność akumulatora zależy od natężenia prądu, którym akumulator jest wyładowany. Przy mniejszym natężeniu



Rys. 72. Krzywa ładowania prądem normalnym /7-giogodz./
akumulatora angielskiego.

prądu i dłuższym czasie wyładowania pojemność się zwiększa, a przy
większym natężeniu - pojemność maleje. Pojemność użyteczna, którą wy-
kazuje akumulator przy wyładowaniu w ciągu 10 godzin, nazywa się po-
jemnością znamionową lub 10-ciogodzinną, a natężenie prądu, przy któ-
rym następuje takie wyładowanie, nazywamy krótko "prądem 10-ciogo-
dzinnym". Pojemność znamionowa akumulatora jest z reguły oznaczona na
nim przez firmę. Jeżeli pojemność użyteczna została wyznaczona dla
innego czasu wyładowania, np. 7 godzin, wówczas nazywa się ona



Rys.73. Krzywa wyładowania akumulatora: A-prądem 10-ciogodzinnym, B - prądem 5-ciogodzinnym.

pojemnością 7-miogodzinną, a prąd, którym się akumulator wyładowuje prądem 7-miogodzinnym.

11. Ładowanie i rozładowanie akumulatora. Normalnie natężenie prądu ładowania i wyładowania dla akumulatora ołowiowego jest wielkością, która na ogół nie należy przekraczać podczas ładowania i wyładowania. Akumulator, wyładowywany prądem, większym od normalnego, ulega szybszemu zużyciu. Wytwórnice zawsze podają normalne natężenie prądu dla swoich akumulatorów. Na ogół, dla wszystkich akumulatorów przenośnych, można bezpiecznie przyjąć za normalne natężenie prądu ładowania i wyładowania $Q/10$ amperów. Prąd normalny niektórych akumulatorów angielskich wynosi $Q/7$ amperów.

Dla naładowania akumulatora należy przezeń przepuścić prąd stały

odpowiednim natężeniu, w kierunku odwrotnym do siły elektromotorycznej akumulatora. W tym celu zacisk dodatni akumulatora łączymy zaciskiem dodatnim źródła zasilającego, zaś zacisk ujemny akumulatora - z zaciskiem ujemnym źródła.

Napięcie źródła ładującego U ma w akumulatorze pokonać siłę przeciwelektromotoryczną oraz opór wewnętrzny akumulatora; innymi słowy, napięcie ładujące równa się sumie siły przeciwelektromotorycznej i spadku napięcia:

$$U = E + Ir \quad \text{lub} \quad U - E = Ir.$$

Ponieważ opór wewnętrzny r jest bardzo mały, więc różnica $U - E$ jest niewielka. Wynika stąd, że dla ładowania akumulatora napięcie źródła może bardzo nieznacznie przewyższać siłę elektromotoryczną akumulatora.

Rozróżniamy dwa sposoby ładowania akumulatorów przenośnych: ładowanie prądem o stałym natężeniu i ładowanie prądem o zmiennym natężeniu, ale przy stałym napięciu przyłożonym.

Ponieważ, w miarę ładowania, siła elektromotoryczna akumulatora stopniowo wzrasta, więc natężenie prądu stopniowo maleje. Aby je utrzymać na jednym poziomie przez cały czas ładowania, należy, w miarę ładowania, powiększać napięcie ładujące. Pewną niedogodnością tego sposobu jest konieczność stosunkowo szerokiego zakresu regulacji napięcia.

Przy ładowaniu prądem o zmiennym natężeniu, a przy stałym napięciu, napięcie ładujące pozostaje niezmiennie przez cały czas ładowania, a prąd ładowania stopniowo maleje z powodu wzrostu siły elektromotorycznej akumulatora. Napięcie ładujące o wartości około 2,3 V. na ogniwo przykładają się bezpośrednio do akumulatora. Na początku ładowania prąd jest bardzo duży i akumulator uzyskuje już w ciągu 3 godzin ładunek, wynoszący około 90% jego pojemności. Przy końcu

odpowiednim natężeniu, w kierunku odwrotnym do siły elektromotorycznej akumulatora. W tym celu zacisk dodatni akumulatora łączymy zaciskiem dodatnim źródła zasilającego, zaś zacisk ujemny akumulatora - z zaciskiem ujemnym źródła.

Napięcie źródła ładującego U ma w akumulatorze pokonać siłę przeciwelektromotoryczną oraz opór wewnętrzny akumulatora; innymi słowy, napięcie ładujące równa się sumie siły przeciwelektromotorycznej i opadu napięcia:

$$U = E + Ir \quad \text{lub} \quad U - E = Ir.$$

Nieważ opór wewnętrzny r jest bardzo mały, więc różnica $U - E$ jest niewielka. Wynika stąd, że dla ładowania akumulatora napięcie źródła musi być bardzo nieznacznie przewyższać siłę elektromotoryczną akumulatora.

Rozróżniamy dwa sposoby ładowania akumulatorów przenośnych: ładowanie prądem o stałym natężeniu i ładowanie prądem o zmiennym natężeniu, ale przy stałym napięciu przyłożonym.

Ponieważ, w miarę ładowania, siła elektromotoryczna akumulatora stopniowo wzrasta, więc natężenie prądu stopniowo maleje. Aby je utrzymać na jednym poziomie przez cały czas ładowania, należy, w miarę ładowania, powiększać napięcie ładujące. Pewną niedogodnością tego sposobu jest konieczność stosunkowo szerokiego zakresu regulacji napięcia.

Przy ładowaniu prądem o zmiennym natężeniu, a przy stałym napięciu, napięcie ładujące pozostaje niezmiennie przez cały czas ładowania, a prąd ładowania stopniowo maleje z powodu wzrostu siły elektromotorycznej akumulatora. Napięcie ładujące o wartości około 2,3 V. stopniowo przybliża się bezpośrednio do akumulatora. Na początku ładowania prąd jest bardzo duży i akumulator uzyskuje już w ciągu 3 godzin ładunek, wynoszący około 90% jego pojemności. Przy końcu

procesu ładowania prąd jest bardzo mały i akumulator nigdy nie ga

Ładowanie prądem przy stałym napięciu skraca wprawdzie czas ład
wania akumulatora, jednakże ładowanie nadmiernie dużym prądem prze
mawia przeciwko tej metodzie. Z tego też względu metody tej nie st
suje się przy ładowaniu akumulatorów przenośnych z płytami masowymi

Regulację napięcia lub natężenia prądu ładowania przeprowadza się
przy pomocy oporników drutowych. W razie ich braku można zastosować
żarówki oświetleniowe. Opór żarówki łatwo obliczyć można z wzoru:

$$R_z = \frac{V}{I} = \frac{V \cdot V}{I \cdot V} = \frac{V^2}{P}$$

Żarówka węglowa, jak wiemy, pobiera 3,5 - 4 W. na świecę. Żarówka
węglowa jest więc korzystniej stosować jako oporniki, gdyż przy tym
samym natężeniu światła mają większą znacznie oporność od żarówek
metalowych. Do ładowania akumulatorów należy użyć żarówek na napięcie
równe lub wyższe od napięcia źródła ładującego. Żarówkę łączy się
sobą równolegle. Liczba żarówek, potrzebnych do otrzymania prądu o
nym natężeniu, zależy od rodzaju żarówek, napięcia źródła i napięcia
baterii.

Akumulatory do ładowania łączy się przede wszystkim w szereg.
W zasadzie, szeregowo powinno się łączyć akumulatory o tej samej po
jemności, a, jeżeli to jest możliwe, to i jednakowego typu, ponieważ
prąd ładowania będzie ten sam dla wszystkich akumulatorów i wtedy
będą się one równomiernie ładować. Nierównomierność przebiegu ładowa
nia różnych typów akumulatorów utrudnia nadzór.

Ilość w szereg połączonych akumulatorów zależy od napięcia źródła
ładującego. Ze względu na nieuniknione spadki napięć w przewodach,
przysięgach i zaciskach kabli, tablicy rozdzielczej i ogniów, uważa się
się w praktyce, że dla pełnego naładowania akumulatora ołowiowego

potrzebne jest napięcie 3 V na ogniwo. Jeżeli napięcie prądu jest zbyt małe dla naładowania posiadanych akumulatorów lub gdy akumulatory mają różną pojemność, należy podzielić je na grupy wg pojemności i prądów ładowania i grupy te ładować równolegle. Poszczególne grupy należy zestawiać z akumulatorów o jednakowej pojemności.

Niedomagania akumulatorów. Wskutek nieodpowiednich warunków pracy i nieumiejętnej konserwacji, w akumulatorze często powstają przedwczesne niedomagania. Do najpospolitszych niedomagań należy wspomniane już zasiarczenie, wypaczenie i kruszenie płyt, co może doprowadzić do wewnętrznego zwarcia, mimo stosowanych separatorów drewnianych, oddzielających płyty akumulatora od siebie. Zwarcie może też być wywołane przez nadmierny osad na dnie naczynia akumulatora. Wskutek nadmiernego ładowania wystąpić może również w akumulatorze odwrócona biegunowość, nienormalna gęstość elektrolitu oraz nadmierne gazowanie. Wszystkie te czynniki wydatnie wpływają na zmniejszenie pojemności akumulatora. W wypadku przerwy w obwodzie wewnętrznym prąd ładowania nie płynie.

W akumulatorze ponadto zdarzyć się mogą uszkodzenia natury mechanicznej, jak np. pęknięcie naczynia, przerwa w obwodzie wewnętrznym, pęknięcie płyty, mechaniczne zanieczyszczenia elektrolitu itp.

Jak więc widzimy, jedynie staranna i odpowiedzialna konserwacja akumulatora zapewnia uzyskanie właściwej wydajności.

Akumulatory ługowe. Akumulatory ołowiowe są niewytrzymałe na transport, wymagają umiejętnej konserwacji, ładowanie ich trwa długo, wydzielają stale żrące wyziewy i są kłopotliwe w magazynowaniu. Akumulatory ługowe pod tymi względami przewyższają akumulatory ołowiowe. Akumulatory ługowe dzielą się na żelazo-niklowe /Edisona/ i kadmo-niklowe /Jungnera/. Oba te typy akumulatorów nadają się szczególnie dla celów trakcyjnych.

Zasada budowy i działania akumulatorów ługowych jest taka sama, jak i w akumulatorach ołowiowych z tym, że naczynie, zawierające akumulator ługowy, zrobione jest z blachy stalowej, która w ogniwach Edisona połączona jest z biegunem ujemnym. W akumulatorze żelazo-niklowym masa czynna elektrody dodatniej zawiera tlenki niklu, a elektroda ujemna - sproszkowane żelazo. W akumulatorze kadmowo-niklowym elektroda ujemna zawiera kadm i małą domieszkę żelaza.

Elektrolit stanowi 20%-owy roztwór wodorotlenku potasu. Reakcje elektrochemiczne, zachodzące w akumulatorze ługowym podczas ładowania i wyładowania, są skomplikowane i nie mogą być przedstawione prostym wzorem.

Końcowym wynikiem reakcji elektrochemicznych podczas wyładowania jest przeniesienie tlenu z elektrody dodatniej na ujemną. Tlenki na płytach dodatnich są redukowane na niższy tlenek niklowy, a żelazo elektrody ujemnej w akumulatorze Edisona jest utleniane w tlenek żelaza. W akumulatorze kadmowo-niklowym natomiast kadm elektrody ujemnej jest utleniany w tlenek kadmu.

Mimo że podczas wyładowania tlen przenoszony jest z elektrody dodatniej na ujemną, żadna jego część się nie oswobadza i nie wydzielają w postaci wolnego tlenu. Akumulator ługowy nie gazuje więc podczas wyładowania.

Podczas ładowania zachodzi odwrotny proces przeniesienia tlenu z elektrody ujemnej na dodatnią.

Podczas wyładowania można stwierdzić nieznaczne zwiększenie gęstości elektrolitu, a podczas ładowania - odpowiednie zmniejszenie. Pomimo, że zachodzące zmiany gęstości są bardzo małe, w praktyce można uważać, że stan naładowania akumulatora ługowego nie ma wpływu na gęstość elektrolitu. Właściwość ta stanowi ważną różnicę pomiędzy akumulatorem ługowym i kwasowym /ołowiowym/.

Z powyższych wyjaśnień wynika, że w akumulatorze wyładowanym obie elektrody są sprowadzone do jednakowego rzędu tlenków.

Reakcje elektrochemiczne w akumulatorze ługowym są odwracalne. Poza reakcjami elektrochemicznymi zasadniczymi, w akumulatorach ługowych zachodzą reakcje chemiczne poboczne, które powodują ich samo-wyładowanie się na drodze chemicznej, znacznie mniej energiczne Jednak, niż w akumulatorze ołowiowym.

Siła elektromotoryczna akumulatorów ługowych wynosi około 1,34 V. Siła elektromotoryczna akumulatora wyładowanego do przepisanej granicy w zasadzie nie różni się od siły elektromotorycznej akumulatora naładowanego. Wynika stąd, że siła elektromotoryczna akumulatora ługowego w najmniejszym nawet stopniu nie może służyć za wskaźnik stanu jego naładowania. Praktycznie przyjmuje się jednak za średnie napięcie wyładowania napięcie 1,2 V.

Opór wewnętrzny akumulatorów kadmowo-niklowych wynosi, zależnie od wielkości i typu ogniw, od 0,5 do kilku tysięcznych oma. Oporność akumulatorów Edisona jest nieco większa. Przy porównaniu oporności, na niekorzyść akumulatorów ługowych przemawia ich niższa siła elektromotoryczna. Opór wewnętrzny, przypadający na jeden wolt siły elektromotorycznej naładowanego akumulatora ługowego, jest znacznie większy od odpowiedniego oporu akumulatora ołowiowego.

C z ę ś ć IV.

M A G N E T Y Z M.

R o z d z i a ł 1.

Pojęcia podstawowe.

1. Magnesy naturalne. Magnesem nazywamy każdy kawałek metalu, który ma szczególną własność przyciągania żelaza. Rudy, odznaczające się tą właściwością, zostały po raz pierwszy odkryte w okolicy miasta Magneszja /Mała Azja /; stąd też pochodzi nazwa magnesu.

Rozróżniamy magnesy naturalne i sztuczne. Magnesem naturalnym jest metal lub jego ruda, który wykazuje własności magnetyczne samoistne. Sztucznym magnesem jest metal, który uzyskał własności magnetyczne wskutek tzw. namagnesowania go. Proces magnesowania zostanie jeszcze dokładnie omówiony.

Magnes naturalny spotyka się w postaci tzw. magnetytu, tj. rudy żelaznej, stanowiącej tlenek żelaza o zawartości około 72 % żelaza. Bogate złoża tej rudy znajdują się w Małej Azji.

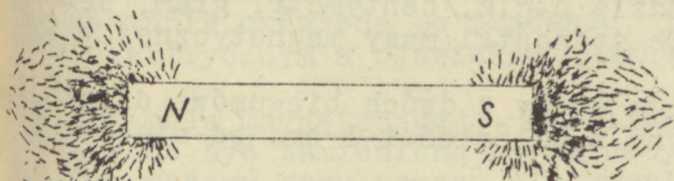
Jak to jest ogólnie wiadomo, magnes ma następujące własności:

1/Przyciąga żelazo oraz niektóre inne metale,

2/sam przyciągany jest przez bieguny magnetyczne ziemskie.

Jeżeli wyobrazimy sobie magnes w kształcie sztabki, zawieszony na nitce, to końcami swymi czyli biegunami zwróci się on w kierunku biegunów magnetycznych ziemskich. Biegun magnesu, zwrócony w kierunku bieguna magnetycznego ziemskiego północnego, nazywamy biegunem południowym, a biegun, zwrócony w stronę przeciwną - biegunem północnym. W tej nomenklaturze trzeba zwrócić baczną uwagę, bo na ogół często spotyka się nomenklaturę odwrotną, błędną.

Masa magnetyczna. Zanurzony w opiłkach żelaznych, magnes przyciągnie je, jak to widać na rys.74. Opilki te przyciągnięte zostają wskutek



Rys.74. Przyciąganie opiłek żelaznych przez magnes.

działania sił, które nazywamy siłami magnetycznymi. Jak widzimy, opiłki zgrupują się wokół biegunów magnesu, które są jak gdyby siedliskiem przyczyny, powodującej powstanie sił magnetycznych. Pojęcie to określamy mianem masy magnetycznej i oznaczamy

literą m . Linie, łączącą oba punkty, w których masy magnetyczne magnesu się grupują, czyli linie, łączącą oba bieguny magnesu, nazywamy osią magnesu. Linie, przechodzącą przez środek magnesu, który w tym przebiegu nie wykazuje żadnych własności magnetycznych, nazywamy linią obojętną. Jest ona prostopadła do osi magnesu. Masę magnetyczną możemy, celem lepszego uzmysłowienia sobie zachodzących zjawisk, porównać z ładunkiem w polu elektrycznym. Biegun północny magnesu oznaczamy literą N, a biegun południowy - literą S.

Prawo Kulomba. Wzajemne działanie na siebie biegunów magnetycznych, tak jak i wzajemne działanie na siebie ładunków elektrycznych, da się ująć w następujące prawa:

- 1/Bieguny jednoimienne odpychają się, a różnoimienne przyciągają się wzajemnie.
- 2/Siła wzajemnego przyciągania się /lub odpychania/ dwóch biegunów określona jest prawem Kulomba i maleje z kwadratem odległości:

$$F = \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2},$$

gdzie m_1 i m_2 oznaczają masy magnetyczne dwóch wzajemnie działających na siebie biegunów.

Podobnie, jak z prawa Kulomba określiliśmy jednostkę elektrostatyczną ładunku elektrycznego w układzie c.g.s./centymetr, gram, sekunda tak i zdefiniować możemy pojęcie jednostki masy magnetycznej w tym układzie.

Jednostkę masy magnetycznej ma każdy z dwóch biegunów, działających na siebie z siłą jednej dyny w odległości 1 cm. od siebie, jeśliby ośrodkiem jest próżnia.

4. Przenikalność magnetyczna. W ośrodkach materialnych, których przenikalność magnetyczną mierzy się przez porównanie z przenikalnością próżni, przyjętą za 1, wzór Kulomba przybiera postać:

$$F = \frac{m_1 \cdot m_2}{\mu r^2},$$

gdzie przez μ oznaczamy przenikalność danego ośrodka.

W związku z pojęciem przenikalności magnetycznej przeprowadzono podział ciał na 3 grupy:

- 1/ferromagnetyczne, o dużej przenikalności /rzędu kilkuset / - 3
- 2/paramagnetyczne, w których $\mu > 1$, np. miedź,
- 3/diamagnetyczne, w których $\mu < 1$, np. bizmut.

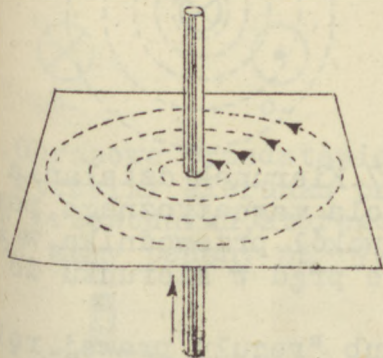
5. Układ jednostek elektromagnetycznych /j.e.m./. Pojęcie przenikalności, która została przyjęta za 1 w próżni, i określenie wielkości jednostkowej sił magnetycznych dały podstawę do powstania układu jednostek, który został nazwany układem jednostek elektromagnetycznych /j.e.m.

W ten sposób mamy 3 układy jednostek:

- 1/praktyczny,
- 2/elektrostatyczny i
- 3/elektromagnetyczny. } c.g.s.

Wzajemna zależność wielkości i pojęć, w tych układach występujących, zostanie omówiona po zbadaniu, jaki związek zachodzi pomiędzy prądem elektrycznym a zjawiskami magnetycznymi.

Linie sił pola magnetycznego. Mówiliśmy już o tym, że energia elektryczna może być zamieniona na magnetyczną i na odwrót. Przekonać się o tym możemy przy pomocy nieskomplikowanego doświadczenia. Jeżeli

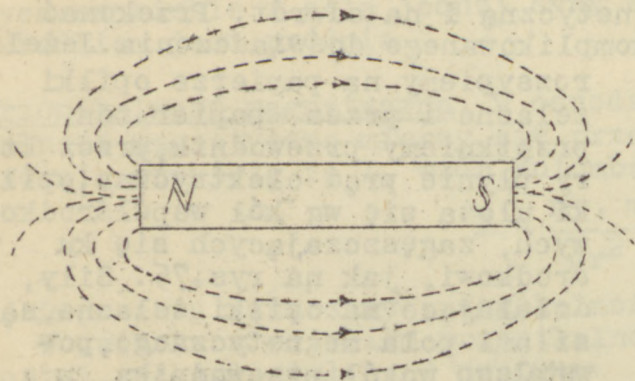


rozsypiemy na papierze opiłki żelazne i przez papier ten przetkniemy przewodnik, przez który płynie prąd elektryczny, opiłki ułożą się wg kół współśrodkowych, zagęszczających się ku środkowi, jak na rys.75. Siły, działające na opiłki żelazne, są siłami pola magnetycznego, powstałego wokół przewodnika, w którym płynie prąd. Koła, powstałe z układających się w ten sposób opiłek, są obrazem linii sił pola magnetycznego. Badając jakąkolwiek siłę, nie wystarczy, jak wiemy, podać jej wielkości, musi-

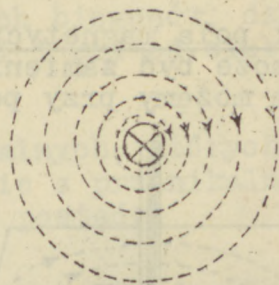
Rys.75. Linie sił pola magnetycznego, powstające wokół przewodnika, przez który przepływa prąd elektryczny.

w także również uwzględnić i kierunek, w jakim ta siła działa. Podobnie, jak dla linii sił pola elektrycznego za kierunek ich działania przyjęliśmy kierunek od ładunku dodatniego do ujemnego, tak i w polu magnetycznym przyjmuje się za kierunek działania linii sił kierunek od bieguna północnego do południowego /rys.76/. Oczywiście jest, że wewnątrz magnesu kierunek ten jest odwrotny.

Kierunek linii sił pola magnetycznego, powstałego wokół przewodnika, w którym płynie prąd, określić możemy przy pomocy tzw. "reguły korkociągu"



Rys.76. Kierunek działania linii sił pola magnetycznego.



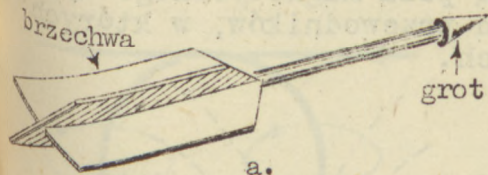
Rys.77. Kierunek działania linii sił pola magnetycznego, powstałego wokół przewodnika, w którym płynie prąd w kierunku do pap

runku do papieru. Ponieważ kierunek przepływu prądu oznaczamy strzałką, a w tym wypadku strzałka zwrócona jest w kierunku do papieru, przekrój przewodnika oznaczony został krzyżykiem, obrazującym brzechwę strzały, widzianej od tyłu. Gdyby prąd płynął w kierunku do papieru, przekrój przewodnika byłby oznaczony kropką, obrazującą brzechwę strzały, widzianej od przodu /rys.78 a, b i c/.

Aby teraz wyznaczyć kierunek linii sił pola magnetycznego, powstałego wokół przewodnika, przez który przepływa prąd, przy pomocy tzw. "reguły korkociągu", należy korkociąg skierować ostrzem

kier
ędzie
br
rys.78
pomocy
prądu
przekr
rys.8

kierunku przepływu prądu. Wtedy kierunek obrotu rączki korkociągu będzie zgodny z kierunkiem linii sił pola magnetycznego /rys.79/.



a.

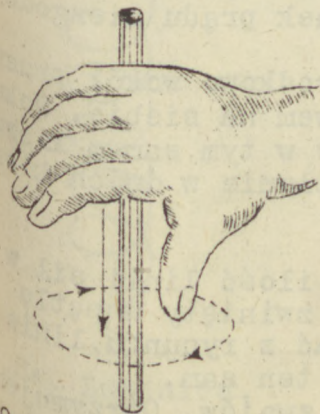


b.

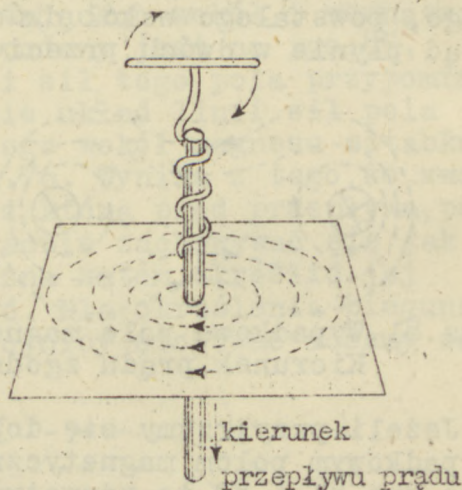


c.

Rys.78. Obrazowe przedstawienie przy pomocy strzałki kierunku przepływu prądu w przewodniku, którego tylko przekrój mamy podany na rysunku.



Rys.80. Reguła prawej ręki. pole magnetyczne wypadkowe, którego



Rys.79. Reguła korkociągu.

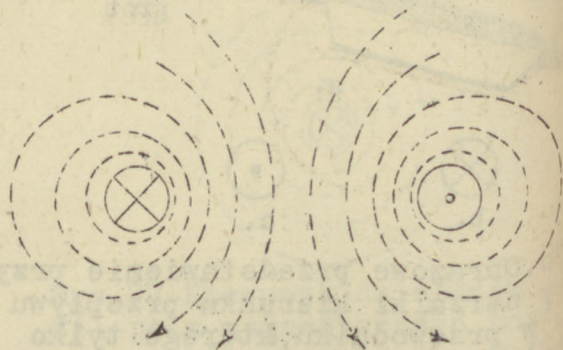
Gdy zwrócimy kciuk prawej ręki w kierunku przepływu prądu przez przewodnik, reszta palców, odchylona od kciuka pod kątem prostym, wskaże nam kierunek linii sił pola magnetycznego, powstałego wokół tego przewodnika /rys.80 /.

7. Wypadkowe pola magnetyczne. Wokół dwóch równoległych przewodników, w których prąd płynie w tym samym kierunku, powstanie

składowymi będą dwa pola magnetyczne, powstałe wokół obu przewodników z osobna /rys.81 /. Rys.82 daje nam obraz pola magnetycznego wypadkowego, powstałego wokół dwóch równoległych przewodników, w których prąd płynie w dwóch przeciwnych kierunkach.



Rys.81. Wypadkowe pole magnetyczne.
Kierunek prądu zgodny.



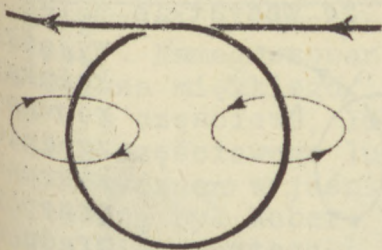
Rys.82. Wypadkowe pole magnetyczne.
Kierunek prądu niezgodny.

Jeżeli przyjrzymy się dobrze wypadkowym polom magnetycznym na rys. rys.81 i 82, to zauważymy, że linie sił pól magnetycznych składowych, stanowiące koła, rozchodzą się współśrodkowo wokół przewodnika, odkształcają się nieco pod wzajemnym wpływem na siebie. Wskutek tego zjawiska przewodniki, w których prąd płynie w tym samym kierunku przyciągają się, a przewodniki, w których prąd płynie w dwóch kierunkach przeciwnych, odpychają się wzajemnie.

8. Solenoid i zwojnica. Gdy zależy nam na tym, aby ilość linii sił w polu magnetycznym zagęścić, stosujemy przewodnik, zwinięty w pętlę czyli tzw. solenoid lub zwój /rys.83 /. Jak widać z rysunku, linie pola magnetycznego wewnątrz zwoju mają kierunek ten sam.

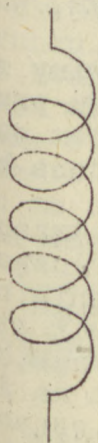
Przewodnik zwinięty być może również w wiele zwojów. Otrzymujemy w ten sposób jeszcze większe zagęszczenie linii sił pola magnetycznego.

ni...
ad...
h...
ten szereg zwojów tworzy nam tzw. zwojnicę czyli cewkę /rys.84/.

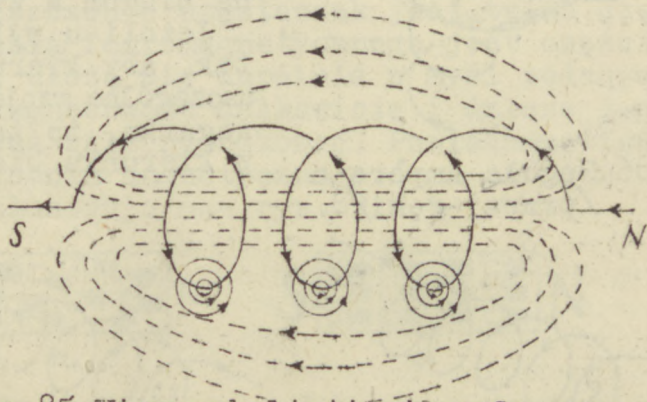


Rys.83. Kierunek linii sił pola magnetycznego w solenoidzie.

Kierunek linii sił pola magnetycznego, powstającego wokół i wewnątrz zwojnicy, podany jest na rys.85. Układ linii sił tego pola przypomina nam zupełnie układ linii sił pola magnetycznego wokół magnesu sztabkowego z rys.76. Wynika z tego, że zwojnica, przez którą prąd przepływa, powinna dokładnie zachowywać się jak magnes, można zatem określić jej biegunowość. Dla określenia biegunowości w zwojnicy stosować możemy cały



Rys.84. Zwojnica.



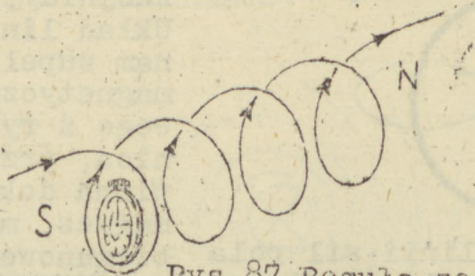
Rys.85. Kierunek linii sił pola magnetycznego w zwojnicy.

szereg rozmaitych reguł, a mianowicie: regułę Ampère'a /prawej ręki/
regułę zegarka, regułę literową itp.

Jeżeli zwojnicę obejmiemy prawą ręką tak, że wszystkie palce,



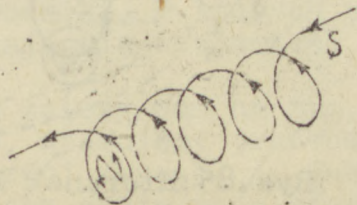
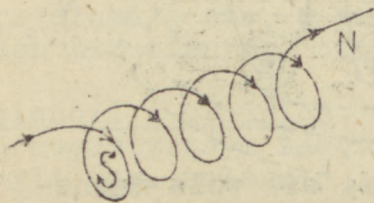
Rys.86.Reguła Ampère'a.
/prawej ręki/.



Rys.87.Reguła zegarka.

kciuk, odchylony pod kątem prostym, wskaże
na biegun N zwojnicy /rys.86 /.

Jeżeli u wylotu zwojnicy ustawimy zegarek
tak, aby kierunek przepływu prądu przez
szczególne zwoje był zgodny z ruchem wskazówek
zegarka, to tarcza zegarka zwrócona będzie
w kierunku bieguna S /rys.87/.



Rys.88.Reguła literowa.

Zaopatrzenie
N i S, służących do
oznaczenia biegunów
magnesu, w strzałkach
jak na rys.88, po-
zwala na na dobór
litery, oznaczającej
odpowiedni biegun
magnesu. Dobrze

wsimy zawsze tę literę, której strzałki zgodne są z kierunkiem prze-
biegu prądu przez poszczególne zwoje.

Teoria cząsteczkowa Webera. Każde ciało ferromagnetyczne możemy nama-
gnesować przez umieszczenie go w zwojnicy, przez którą przepływa prąd
elektryczny. Namagnesowanie to może być chwilowe /jak w wypadku
użycia żelaza miękkiego/, lub stałe /jak w wypadku użycia stali/; może
ono być częściowe, lub całkowite.

Kwestię częściowego lub całkowitego namagnesowania jakiegoś ciała
ferromagnetycznego wyjaśnia nam tzw. teoria cząsteczkowa magnetyzmu,
której twórcą był Weber. Wg tej teorii w każdym ciele ferromagnetycz-
nym wszystkie cząsteczki stanowią jak gdyby małe magnesy. Jeśli zatem
cząsteczki ciała ferromagnetycznego ułożone są chaotycznie, linie sił
magnetycznych, wytworzone przez nie, wzajemnie się znoszą i w ten
sposób siła wypadkowa równa się zeru. Pod wpływem magnesowania cząste-
czki te układają się tak, że tymi samymi biegunami zwrócone są w jed-
nym kierunku. Jeżeli to przemieszczenie cząsteczek jest tylko części-
owe, to i stan namagnesowania ciała ferromagnetycznego jest częściowy.
Jeżeli zaś wszystkie cząsteczki ułożą się zupełnie w myśl podanych wy-
szędzi zasad, ciało to zostaje namagnesowane całkowicie i dalsze jego ma-
gnesowanie nie zwiększy nam już siły wypadkowej. Powiadamy wtedy,
że ciało to osiągnęło stan nasycenia magnetycznego.

Teorię cząsteczkową Webera ilustruje nam rys. 89 a, b i c.



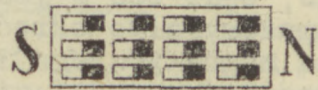
a.

ciało magnety-
cznie obojętne



b.

ciało części-
owo namagnesowane



c.

ciało namagnesowane
do stanu nasycenia

Rys. 89. Ilustracja teorii cząsteczkowej Webera.

Pojęcia i jednostki. Zjawisko histerezy. Elektromagnetyczny układ jednostek. Prawo Olma dla obwodu magnetycznego.

1. Natężenie pola magnetycznego. Podstawowym pojęciem, związanym ze zjawiskiem magnetyzmu, jest pojęcie natężenie pola magnetycznego. Podobnie jak przy określeniu natężenia pola elektrycznego, tak w tym wypadku przez natężenie pola magnetycznego należy rozumieć siłę w dynach, działającą na biegun magnetyczny o masie magnetycznej jednostkowej, umieszczonej w tym polu. Natężenie pola magnetycznego oznaczamy literą H i mierzymy w gaussach. Jeżeli siła, przypadająca na jednostkową masę magnetyczną, umieszczoną w danym punkcie pola, wynosi jedną dynę, to natężenie pola w danym punkcie równa się jednemu gaussowi.

A zatem

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

2. Strumień i indukcja magnetyczna. Pole magnetyczne składa się z pewnej ilości linii sił magnetycznych. Wszystkie te linie sił magnetycznych składają się na strumień magnetyczny, który oznaczamy grecką literą ϕ . Strumień mierzy się bądź w ilości linii sił pola magnetycznego, bądź też w jednostkach, zwanych maxwellami. Strumień magnetyczny możemy więc określić jako strumień, mający np. 150.000 linii sił pola magnetycznego lub 150.000 maxwelli. Z pojęcia strumienia magnetycznego wywodzi się pojęcie indukcji magnetycznej czyli gęstości strumienia magnetycznego. Przez gęstość strumienia magnetycznego rozumieć należy strumień, przypadający na jednostkę powierzchni przechodzący przez nią pod kątem prostym. Jeśli oznaczymy indukcję magnetyczną przez B , a powierzchnię, przez którą ten strumień

przechodzi, przez s, to z definicji wynika, że

$$B = \frac{\Phi}{s}.$$

W odległości 1 cm. od jednostkowej masy magnetycznej, umieszczonej w próżni, indukcja magnetyczna wynosi 1 maxwell/cm². W tym samym punkcie pola magnetycznego natężenie pola wynosi 1 gauss. Jak więc widzimy, w próżni wielkość indukcji magnetycznej odpowiada wielkości natężenia pola magnetycznego.

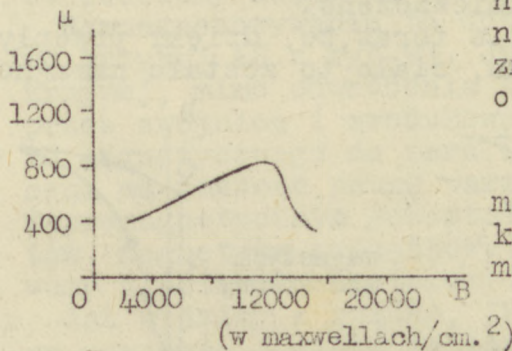
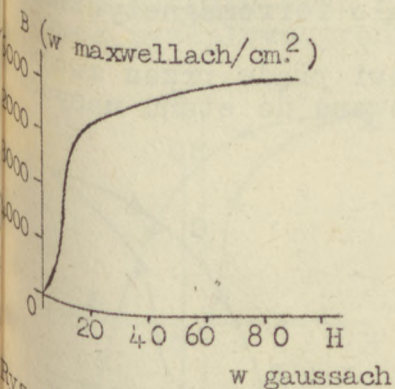
Krzywa przenikalności. W ośrodku o przenikalności μ natężenie pola magnetycznego jest μ razy mniejsze, podczas gdy indukcja magnetyczna, niezależna od przenikalności ośrodka, nie ulega żadnej zmianie. A więc w ośrodku tym

$$B = \mu H.$$

Przenikalność magnetyczną ośrodka określić więc możemy z wzoru:

$$\mu = \frac{B}{H}.$$

Zaznaczyć należy, że μ nie jest wielkością stałą i zależy od wiel-



Rys.90. Krzywa zależności B od H.

Rys.91. Krzywa przenikalności otrzymana z krzywej z rys.90/.

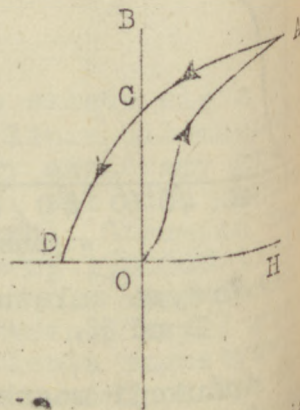
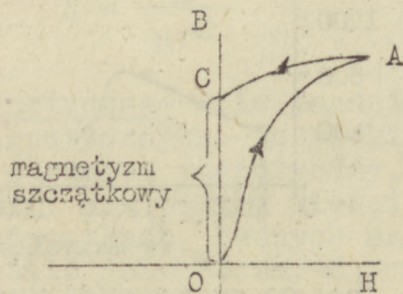
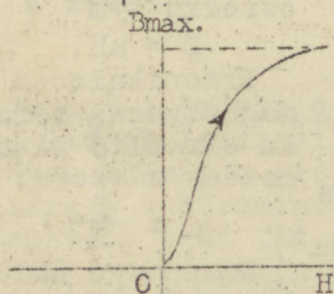
indukcji magnetycznej, od rodzaju użytego ciała ferromagnetycznego, a nawet od jego temperatury. Każde ciało ferromagnetyczne

charakteryzując się zwykle przez podanie krzywej zmian B w zależności od zmian H . Krzywa taka przedstawiona jest na rys. 90. Z krzywej łatwiej obliczyć możemy przenikalność magnetyczną danego ciała ferromagnetycznego.

Ta sama zależność da się również przedstawić przy pomocy innego rodzaju krzywej - krzywej przenikalności, przedstawiającej nam zależność przenikalności magnetycznej od gęstości strumienia magnetycznego /rys.91/. Każdą z tych krzywych wykreślić można z drugiej krzywej

4. Krzywa histerezy. Jak wiemy, pod wpływem przepływu prądu elektrycznego przez zwojnicę możemy namagnesować jakieś ciało ferromagnetyczne, w tej zwojnicy umieszczone.

Wyobraźmy sobie teraz, że, dzięki przepływowi prądu przez zwojnicę w jednym kierunku, ciało to zostało namagnesowane do stanu nasycenia

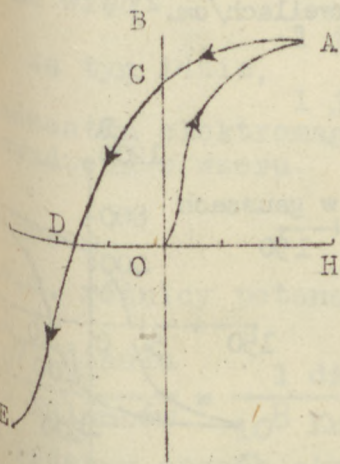


Rys.92. Krzywa magnesywania pierwotnego.

Rys.93. Początek procesu rozmagnesowywania.

Rys.94. Zredukowanie magnetyzmu szczątkowego do zera.

jak się później przekonamy, natężenie prądu pola magnetycznego w tym ciele zależne jest od wielkości prądu, przepływającego przez zwojnicę. Stan namagnesowania danego ciała przedstawić możemy wielkością indukcji magnetycznej, występującej w tym ciele pod wpływem działającego pola magnetycznego o pewnym natężeniu. W ten sposób zmianę stanu namagnesowania danego ciała ferromagnetycznego przedstawić możemy wykresem zależności indukcji magnetycznej od natężenia pola magnetycznego. Wykres ten przedstawiony jest na rys.92. Po osiągnięciu przez indukcję magnetyczną wartości, oznaczonej na wykresie przez B_{max} , dalsze już nie zwiększamy natężenia pola magnetycznego, bo nie wywrze ono żadnego wpływu na stan namagnesowania danego ciała, które osiągnęło w tym punkcie stan nasycenia magnetycznego. Jeśli teraz odwrócimy kierunek przepływu prądu, to będziemy ciało to roznamagnesowywać.



Roznamagnesowywanie to odbywać się będzie wg krzywej AC z rys.93. Jak widzimy z tej krzywej, mimo odwrócenia kierunku prądu przez zwojnicę i zredukowania natężenia pola magnetycznego do zera, indukcja magnetyczna ma jeszcze pewną wartość, gdyż w ciele ferromagnetycznym pozostał jeszcze pewien tzw. magnetyzm szczątkowy. Zjawisko to nazywamy zjawiskiem histerezy.

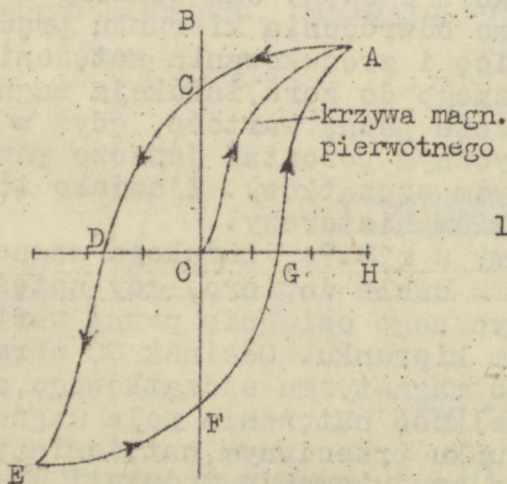
Jak widzimy z rys.94, indukcja magnetyczna zniknie w ciele dopiero, gdy natężenie pola magnetycznego osiągnie pewną wartość w przeciwnym kierunku. Odcinek OC obrazuje nam wielkość magnetyzmu szczątkowego, a odcinek OD - wielkość natężenia pola magnetycznego w kierunku przeciwnym, natężenia, potrzebnego dla zredukowania indukcji magnetycznej w ciele ferromagnetycznym do zera.

Rys.95. Namagnesowanie do stanu nasycenia w kierunku przeciwnym.

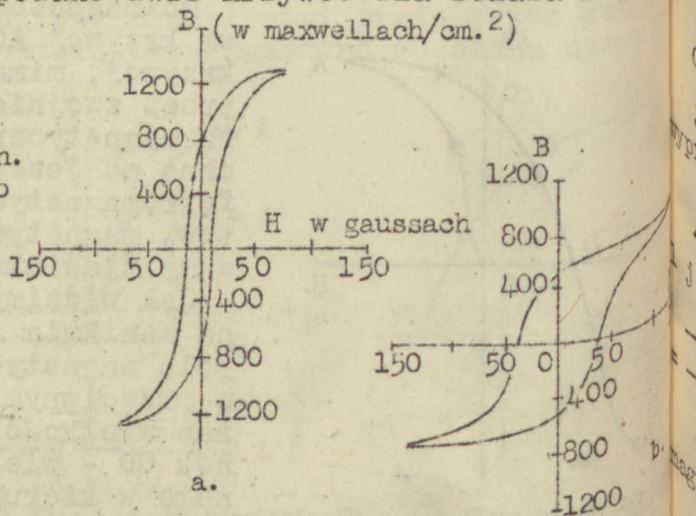
Jeżeli teraz w dalszym ciągu będziemy zwiększali natężenie pole magnetyczne w przeciwnym kierunku, to dojdziemy do punktu E, w którym to ciało osiąga stan nasycenia magnetycznego, ale z biegunowością odwrotną, niż poprzednio /rys.95 /. Jeżeli teraz znowu odwrócimy runek przepływu prądu przez zwojnicę, to otrzymamy krzywą ACDEFGA /rys.96 /. Krzywa taka nazywa się krzywą histerezy, a krzywa OA nazywa się krzywą magnesowania pierwotnego.

Powierzchnia tej krzywej odpowiada energii elektrycznej, która się traci na ciepło, rozpraszające się w materiale ferromagnetycznym podczas magnesowania w dwóch kierunkach.

Krzywa histerezy jest różna dla różnych materiałów ferromagnetycznych. Na rys. 97 a i b mamy podane dwie krzywe: dla żelaza miękkiego i dla stali.



Rys.96. Krzywa histerezy.



Rys.97. Krzywe histerezy: a. dla żelaza miękkiego, b. dla stali.

Wzajemna zależność wielkości jednostek praktycznych i elektromagnetycznych. Jeżeli wewnątrz solenoidu powstaje pod wpływem przepływu prądu pole magnetyczne, to wynika z tego, że natężenie przepływającego prądu może być określone wielkością natężenia pola magnetycznego, powstałego wewnątrz solenoidu w samym jego środku /gdzie natężenie pola magnetycznego jest jednorodne /.

Tak więc przyjęto, że prąd ma natężenie, równe jednej jednostce elektromagnetycznej, gdy, przepływając przez przewodnik o długości 1 cm. w kształcie łuku koła o promieniu 1 cm., wytwarza w środku tego koła pole magnetyczne o natężeniu 1 Gaussa.

Jednostka ta jest stosunkowo duża. Znana ona była przed przyjęciem praktycznego układu jednostek. Amper, praktyczna jednostka prądu, powstał przez podzielenie jednostki elektromagnetycznej prądu przez 10. Tak więc

$$1 \text{ j.e.m. prądu} = 10 \text{ amperów.}$$

$$1 \text{ j.e.m. ładunku elektrycznego} = 10 \text{ Kulombów.}$$

Jednostka elektromagnetyczna różnicy potencjałów może więc być wprowadzona z wzoru

$$V = \frac{W}{Q}.$$

A zatem

$$1 \text{ j.e.m. różnicy potencjałów} = \frac{1 \text{ erg}}{1 \text{ j.e.m. ładunku elektrycznego}} =$$

$$\frac{1}{10^7} \text{ dżaula} = \frac{1 \text{ dżaul}}{10^8 \text{ Kulombów}} = \frac{1}{10^8} \text{ wolta.}$$

W podobny sposób określić możemy z prawa Ohma jednostkę elektromagnetyczną oporności elektrycznej:

$1 \text{ om} = \frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ amper}} = \frac{10^8 \text{ j.e.m. różnicy potencjałów}}{\frac{1}{10} \text{ j.e.m. prądu}}$ = $10^9 \text{ j.e.m. oporno}$
elektrycznej.

6. Prawo Ohma dla obwodu magnetycznego. Wielkość natężenia pola magnetycznego, powstałego wskutek przepływu prądu przez zwojnicę, zależy wprost proporcjonalnie od natężenia tego prądu i ilości zwojów zwojownicy. W skład wzoru na natężenie pola magnetycznego wchodzi poza stałą współczynnik 4π . Tak więc

$$H = \frac{4\pi Iz}{l},$$

gdzie przez I oznaczamy natężenie prądu, przez z - ilość zwojów w zwojnicy, a przez l - jej długość.

Jeżeli natężenie prądu podajemy w amperach, to wzór ten przybiera postać:

$$H = \frac{4\pi Iz}{10 l} = 1,256 \frac{Iz}{l}.$$

Z powyższego wzoru określić możemy również wielkość strumienia magnetycznego, powstającego w zwojnicy:

$$\phi = Bs = \mu Hs = 1,256 \frac{\mu Iz s}{l}.$$

Ten sam wzór możemy napisać w innej postaci:

$$1,256 Iz = \phi \cdot \frac{l}{\mu s}.$$

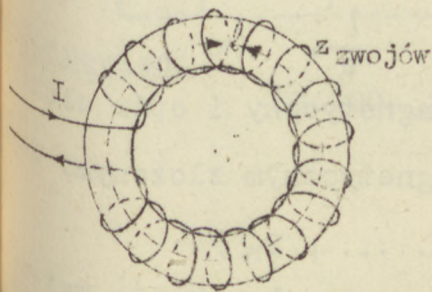
Często spotyka się zamiast Iz oznaczenie Az , ponieważ we wzorze tym I podane jest w amperach. Iloczyn Az nazywamy amperozwojami. Wyrażenie $1,256 Az$ określa nam ilość amperozwojów, potrzebnych

Wytworzenia danego strumienia magnetycznego. Zaznaczyć należy, że decydują tu amperozwoje, a nie same ampery, lub sama ilość zwojów, wszystko jest bowiem jedno, czy dla wytworzenia danego strumienia użyjemy zwojnicy o 100 zwojach, przez którą przepływać będzie prąd o natężeniu 2 amperów, czy też zwojnicy o 50 zwojach, przez którą przepływać będzie prąd o natężeniu 4 amperów.

Wyrażenie $1,256 \cdot I \cdot N$ nazywamy siłą magnetomotoryczną /S.M.M./, ona bowiem decyduje o wielkości strumienia, przepływającego przez obwód magnetyczny. W skrócie siłę magnetomotoryczną oznacza się często literą M. Wyrażenie l/μ_s nazywamy opornością magnetyczną obwodu magnetycznego. Oznacza się ją często literą S. Siłę magnetomotoryczną mierzy się w jednostkach, zwanych gilbertami /G/. Oporność magnetyczną mierzymy w oerstedach. Obwód magnetyczny ma opór magnetyczny jednego oersteda wtedy, gdy pod działaniem siły magnetomotorycznej jednego gilberta powstaje w obwodzie strumień magnetyczny jednego maxwella.

Siłę magnetomotoryczną, podobnie jak siłę elektromotoryczną, mierzymy pracą, potrzebną na przeniesienie "jednostki ładunku magnetycznego" /a więc jednostkowej masy magnetycznej/ jeden raz wokół zamkniętego obwodu magnetycznego.

Jeżeli będziemy mieli pierścień, wykonany z materiału ferromagnetycznego o przenikalności magnetycznej μ , na którym zostało nawiniętych Z zwojów, przez które przepływa prąd o natężeniu i j.e.m. prądu lub I amperów /rys.98/, to praca, potrzebna na jednokrotne przeniesienie jednostkowej masy magnetycznej wokół obwodu



rys.98. Zwojnica toroidalna, ilustrująca definicję gilberta - jednostki siły magnetomotorycznej.

magnetycznego, wyniesie

$$W = 4\pi iz = \frac{4\pi Iz}{10} \text{ ergów.}$$

A więc siła magnetomotoryczna

$$\text{S.M.M.} = 4\pi iz = \frac{4\pi Iz}{10} \text{ gilbertów.}$$

Wzór na siłę magnetomotoryczną napisać zatem możemy w formie następującej:

$$M = \phi \cdot S.$$

Wzór ten przypomina nam prawo Ohma, z którego

$$E = IR.$$

Siła magnetomotoryczna przypomina bowiem siłę elektromotoryczną, strumień magnetyczny - prąd, a oporność magnetyczna odpowiada zupełnie oporności elektrycznej.

Jeżeli porównamy ze sobą wyrażenia:

$$S = \frac{l}{\mu} \cdot \frac{l}{s} \text{ i } R = \rho \cdot \frac{l}{s},$$

to podobieństwo tych dwóch wzorów na opór magnetyczny i opór elektryczny staje się jeszcze bardziej uderzające.

Bardzo często spotykamy się z obwodem magnetycznym złożonym, tak jak w wypadku obwodu elektrycznego,

$$M = \phi / S_1 + S_2 + \dots + S_n /.$$

Gdy chodzi nam o obliczenie amperozwojów, potrzebnych dla wytworzenia danego strumienia magnetycznego, stosujemy wzór:

$$1,256Az = \phi / S_1 + S_2 + \dots + S_n /,$$

skąd

$$Az = \frac{\phi}{1,256} \cdot / S_1 + S_2 + \dots + S_n /.$$

A zatem

$$A_z \approx 0,8 \phi / S_1 + S_2 + \dots + S_n /$$

Do obliczenia oporu magnetycznego obwodu wartość μ otrzymujemy zwykle z krzywej przenikalności /rys.91 /.

Przykład.

Na pierścieniu żelazny o promieniu 10 cm. i przekroju 10 cm² nawinięto 100 zwojów drutu. Obliczyć całkowity strumień magnetyczny w żelazie dla prądów o natężeniu 0,5, 1 i 5 A. Pozostałe dane należy wyznaczyć z krzywej B-H, wykreślonej wg poniższej tabelki:

H	1	2	4	8	10	14
B	6000	10500	13750	15000	15500	16000

Odpowiedź. x)

60.000, 105.000 i 155.000 maxwelli.

x) Poczawszy od niniejszego przykładu podawane będą tylko odpowiedzi, a nie całkowite rozwiązania, ponieważ rozwiązywanie zadań nie powinno już sprawiać Czytelnikowi specjalnych trudności.

I N D U K C Y J N O Ś Ć.

R o z d z i a ł 1.

Samoi indukcja.

1. Strumieniozwoje. Wiemy już o tym, że, gdy w przewodniku płynie prąd elektryczny, wokół tego przewodnika powstaje pole magnetyczne, a wzdłuż pewien strumień magnetyczny. Wiemy również, że, gdy natężenie tego prądu elektrycznego się zmieni, to i strumień magnetyczny ulegnie zmianie. Zjawisko to jest odwracalne, tzn., że pod wpływem zmian strumienia magnetycznego, otaczającego jakiś przewodnik, na końcach tego przewodnika pojawi się siła elektromotoryczna, a gdy końce tego przewodu połączymy ze sobą, czyli gdy obwód elektryczny zamkniemy, to przez przewodnik popłynie prąd. Zjawisko to nazywamy zjawiskiem indukcji elektromotorycznej - siłą elektromotoryczną indukcji, a prąd, który popłynie przez przewodnik, o ile obwód elektryczny będzie zamknięty, nazywamy prądem indukcyjnym lub indukowanym. Wielkość siły elektromotorycznej indukcji nie zależy bynajmniej od wielkości strumienia magnetycznego, obejmującego dany przewodnik, ale od szybkości zmian tego strumienia.

Gdy badamy wielkość siły elektromotorycznej, powstałej wskutek zjawiska indukcji elektromagnetycznej, to okaże się, że nie sama szybkość zmian strumienia magnetycznego wpływa na wielkość siły elektromotorycznej indukcji. Gdyby bowiem zmiany strumienia magnetycznego zachodziły w zwojnicy, składającej się tylko z jednego zwoju, siła elektromotoryczna indukcji byłaby z razy mniejsza, niż przy zmianach w zwojnicy z wieloma zwojami. Wobec tego, badając wielkość siły elektromotorycznej indukcji lub wielkość prądu indukowanego w wypadku, gdy obwód elektryczny

zamięty, rozpatrujemy zawsze nie szybkość zmian strumienia magnetycznego, a szybkość zmian strumieniozwojów /tj. iloczynu strumienia magnetycznego przez ilość zwojów zwojownicy/. Ponieważ w zwojownicy

$$\phi = \frac{1.256 I z \mu s}{l}$$

to strumieniozwoje

$$\phi z = \frac{1.256 I z^2 \mu s}{l}$$

Wielkość strumieniozwojów zależy m.inn. od natężenia pola magnetycznego, które, jak wiemy, odpowiada

$$H = \frac{4 \pi I z}{l}$$

a w wypadku, gdy natężenie prądu podane mamy w amperach, a nie w jednostkach elektromagnetycznych,

$$H = \frac{4 \pi I z}{10 l}$$

Zależność natężenia pola magnetycznego od kształtu przewodnika. Natężenie pola magnetycznego, a zatem pośrednio i wartość strumieniozwojów, zależy od współczynnika

$$\frac{4 \pi z}{10 l}$$

który jest stały. Współczynnik ten ma taką, a nie inną postać, bo z zwojów zostało nawiniętych w formie wielokrotnego solenoidu/zwojownicy/. Jeżeli weźmiemy przewodnik prosty, w którym płynie prąd o natężeniu I amperów, to wokół niego również powstanie pole magnetyczne. W odległości r cm. od tego przewodnika natężenie pola

magnetycznego

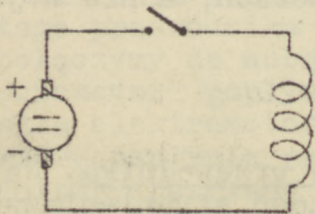
$$H = \frac{2I}{10r} = 0,5 \frac{I}{r}.$$

Jak widzimy, w tym wypadku występuje tu współczynnik

$$\frac{2}{10r}.$$

Wynika z tego, że kształt przewodnika wpływa na wielkość strumieniowojów i to w ten sposób, że zmienia się współczynnik stały, występujący we wzorze na strumieniozwoje.

3. Powstawanie siły elektromotorycznej samoindukcji. Przykład powstania siły elektromotorycznej indukcji mamy podany na rys.99. Na rysunku tym mamy obwód, złożony ze źródła siły elektromotorycznej stałej, zwojnicy i wyłącznika. Gdy zamkniemy wyłącznik, prąd nieodrazu narodzi się do swego normalnego natężenia, określonego z prawa Ohma, lecz w ciągu ułamka sekundy będzie narastał powoli /wykres



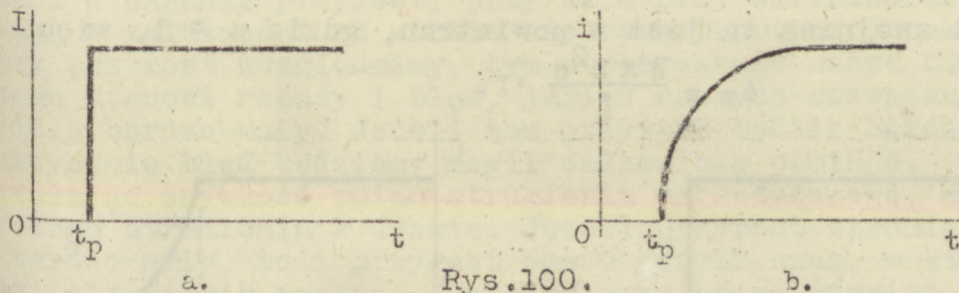
Rys.99. Obwód, ilustrujący powstawanie siły elektromotorycznej samoindukcji.

na rys.100 a i b /. Przyczyną tego stopniowego wzrostu prądu jest powstająca w zwojnicy siła elektromotoryczna indukcji. Ponieważ żaden in obwód nie działa tu na naszą zwojnicę, ka, w niej zachodzące, powstają tylko wskutek zmian w obwodzie własnym, tę siłę elektromotoryczną nazywa się siłą elektromotoryczną indukcji własnej lub też siłą elektromotoryczną indukcji. Siła ta, która powstaje w obwodzie

pod wpływem zmian strumienia magnetycznego, ma taki kierunek, aby przeciwdziałać zmianom strumienia, który ją wywołał. Reguła powyższa znana jest p.n. reguły Lenza. Ponieważ kierunek działania tej siły elektromotorycznej jest przeciwny kierunkowi siły elektromotorycznej

źródła, nazywamy ją siłą przeciwelektromotoryczną samoindukcji.

Na podanym przykładzie widzieliśmy, że prąd w obwodzie, w który włączona jest jakaś indukcyjność, wzrasta powoli. Przyczyną tego stopniowego wzrostu prądu jest siła przeciwelektromotoryczna samoindukcji, która, w myśl reguły Lenza, działać będzie w takim kierunku, aby przeciwstawić się przyczynie, która jej powstanie wywołuje.



Wzrost prądu: a. W obwodzie, w skład którego wchodzi tylko opornik.
b. W obwodzie, w którym występuje indukcyjność.

Ponieważ przy zamykaniu obwodu przyczyną, wywołującą powstanie siły elektromotorycznej samoindukcji, jest wzrost prądu, to siła ta powstanie w takim kierunku, aby wzrost prądu zahamować. Jeżeli obwód otworzymy, to przyczyną, wywołującą powstanie siły przeciwelektromotorycznej samoindukcji, będzie malenie prądu, a więc siła ta powstanie w takim kierunku, aby to zmniejszanie się prądu zahamować. Wypadek ten ilustrują nam wykresy na rys.101 a i b.

Prądy samoindukcyjne, płynące pod wpływem siły przeciwelektromotorycznej samoindukcji, mają oczywiście ten sam kierunek, co i ta siła.

Strumieniozwoje w takiej zwojnicy obliczyć możemy z podanego poprzednio wzoru:

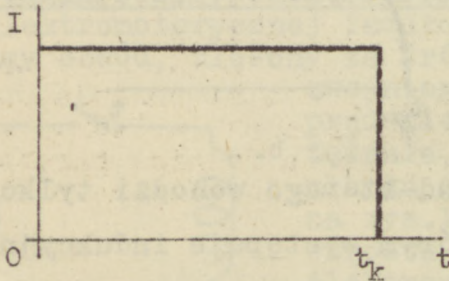
$$\phi_z = \frac{4 \pi I z^2 \mu_s}{l}$$

co możemy napisać w innej formie:

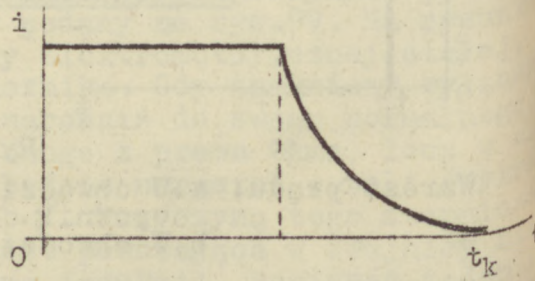
$$\phi_z = \frac{4 \pi z^2 \mu_s}{l} \cdot I.$$

Ponieważ zwojnica ta jest w powietrzu, gdzie $\mu = 1$, więc

$$\phi_z = \frac{4 \pi z^2 s}{l} \cdot I.$$



a.



b.

Rys. 101.

Malenie prądu: a. W obwodzie, w skład którego wchodzi tylko opór
b. W obwodzie, w którym występuje indukcyjność.

4. Współczynnik samoindukcji. Wartość wyrażenia

$$\frac{4 \pi z^2 s}{l}$$

zależna jest od wymiarów zwojnicy; wyrażenie to określamy mianem współczynnika indukcyjności własnej lub współczynnika samoindukcji.

oznaczamy literą L.

$$\phi z = LI.$$

We wzorze powyższym L jest wielkością stałą i L jest wielkością stałą, natomiast ϕ i I są wielkościami zmiennymi, przy czym szybkość zmian strumienia magnetycznego zależy od szybkości zmian prądu, płynącego w obwodzie. Gdy mówimy o zmianach jakichś wielkości, stawiamy zazwyczaj przed symbolem, oznaczającym tę wielkość, literę d .

Symbol d oznacza przyrost, przy czym przy wielkościach, które się zmieniają w zależności od siebie nie wprost proporcjonalnie; im mniejszy przyrost uwzględnimy, tym stwierdzenie nasze będzie bliższe istotnemu stanowi rzeczy i błąd, jaki w naszych rozważaniach popełnimy, będzie bardzo mały. Jeżeli ten przyrost będzie bardzo mały, to praktycznie błąd będziemy mogli całkowicie pominąć.

Rozważając szybkość zmian strumienia magnetycznego, mamy na myśli zmiany tego strumienia w czasie. Jeżeli przyrost strumienia uwzględnimy bardzo mały, to i przyrost czasu /czyli czas, w którym zmiana wartości strumienia nastąpi / musimy przyjąć za również bardzo mały. Wynika z tego, że szybkość zmian strumienia magnetycznego w czasie możemy określić wyrażeniem

$$\frac{d\phi}{dt}.$$

Odpowiednio zmieniać się będzie i natężenie prądu, która to zmiana wywołuje zmianę strumienia magnetycznego. Uwzględniając więc szybkość zmian prądu w czasie, możemy przedstawić ją wyrażeniem

$$\frac{dI}{dt}.$$

Jeżeli we wzorze

$$\phi z = LI$$

będziemy chcieli uwzględnić szybkość zmian strumienia magnetycznego w zależności od szybkości zmian prądu, napisać to możemy w formie:

$$\frac{d\phi}{dt} \cdot z = L \cdot \frac{dI}{dt}.$$

Z wzoru tego możemy obliczyć współczynnik samoindukcji

$$L = z \cdot \frac{\frac{d\phi}{dt}}{\frac{dI}{dt}} = z \cdot \frac{d\phi}{dI}.$$

Ponieważ z jest wielkością stałą, możemy oznaczyć ją przez k , ponieważ przez k oznaczamy zazwyczaj w matematyce dowolną stałą toś. Wzór nasz zatem przybierze formę:

$$L = k \cdot \frac{d\phi}{dI}.$$

We wzorze tym zmienna jest tylko wartość strumienia i wartość prądu, jak jednak widzimy, stosunek tych dwóch zmiennych wielkości jest wielkością stałą.

Mamy tu analogię z wzorem z elektrostatyki na pojemność, gdzie

$$C = \frac{Q}{V}, \text{ przyczym } \frac{Q}{V} = \text{const.}$$

Gdy zwojnica będzie nawinięta na rdzeniu z ciała z ferromagnetycznego, to współczynnik samoindukcji L będzie również zależał od przenikalności magnetycznej μ tego ciała, a więc w takim wypadku

$$\frac{d\phi}{dI} \neq \text{const.}$$

Przykład.

Zwojnica o rdzeniu powietrznym ma indukcyjność 2000 μH . Obliczyć strumieniozwoje, powstające w tej zwojnicy przy przepływie prądu o natężeniu 2 A.

Odpowiedź: 400.000.

Wielkość siły przeciwelektromotorycznej samoindukcji. Jak już wiemy, wielkość siły przeciwelektromotorycznej samoindukcji zależy od szybkości zmian strumieniozwojów. Możemy więc napisać, że siła przeciwelektromotoryczna samoindukcji

$$e = k \cdot \frac{d\phi}{dt} \cdot z.$$

Siłę tę oznaczamy w tym wypadku przez e , bo nie jest ona wielkością stałą, a wielkością zmienną i zależy od szybkości zmian strumieniozwojów; każdą zaś wielkość zmienną możemy wyrazić przez jej wartość chwilową, tj. wartość, jaką ta wielkość ma w danej chwili. Przy oznaczaniu wszelkich wartości chwilowych używamy zawsze małych liter alfabetu.

Skądinąd wiemy, że

$$\frac{d\phi}{dt} \cdot z = L \cdot \frac{dI}{dt}.$$

Wobec tego wzór na wielkość siły przeciwelektromotorycznej samoindukcji wyrazić możemy przez

$$e = kL \cdot \frac{dI}{dt}.$$

W podanych wyżej wzorach k jest tzw. współczynnikiem proporcjonalności i jest dla dobranych odpowiednio jednostek równe jedności. Współczynnik k ma wartość stałą. W wypadku, gdy dla obliczenia siły przeciwelektromotorycznej samoindukcji do wzorów powyższych podstawiamy wartości, wyrażone w jednostkach różnorodnych, wziętych z różnych układów jednostek, k przybiera wtedy odpowiednią oderwaną wartość liczbową.

Ponieważ siła przeciwelektromotoryczna samoindukcji ma, zgodnie z regułą Lenza, kierunek przeciwny sile elektromotorycznej, która

jej powstanie wywołała, to też, przy uwzględnieniu kierunku jej działania, wzór nasz przybierze postać:

$$e = -kL \cdot \frac{dI}{dt}.$$

Przykład.

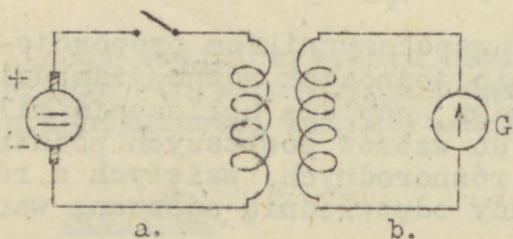
Prąd w zwojnicy o indukcyjności 30 H. maleje o 4 A. na sekundę. Obliczyć siłę przeciwelektromotoryczną, jaka się w tej zwojnicy zaindukuje.

Odpowiedź: 120 V.

R o z d z i a ł 2.

Indukcja wzajemna.

1. Zjawisko indukcji wzajemnej. Na rys. 102 mamy dwa obwody elektryczne a i b. W obwód a włączone jest źródło siły elektromotorycznej, wyłącznik i zwojnica. W obwodzie b mamy galwanometr /G/ i zwojnicę, która znajduje się bardzo blisko zwojnicy z obwodu a.



Rys. 102. Dwa obwody, ilustrujące zjawisko indukcji wzajemnej.

W momencie, gdy obwód a zamkniemy, strzałka galwanometru wychyli się na chwilę, wykazując chwilowy przepływ prądu w obwodzie b, poczym powróci do swego położenia zerowego. To samo zjawisko zajdzie w wypadku, gdy wyłącznik rozewrzemy, przerywając w ten sposób obwód a.

Zjawisko to nazywamy zjawiskiem indukcji wzajemnej. Obwód, w który włączone jest źródło siły elektromotorycznej, nazywamy obwodem pierwotnym,

obwód, w którym płynie prąd dzięki zjawisku indukcji wzajemnej, nazywamy obwodem wtórnym. Istotę tego zjawiska bardzo jest łatwo wytłumaczyć sobie, bo, jak wiemy, wszelkie zmiany strumienia magnetycznego wokół jakiegoś przewodnika wywołują powstawanie lub, wyrażając się ściślej, zaindukowanie się w tym przewodniku siły elektromotorycznej indukcji. W tym wypadku zmienia się strumień, powstający w zwojnicy, włączonej w obwód pierwotny. Ponieważ jednak, jak to widać na rys. 102, część tego strumienia obejmuje również i zwojnicę, włączoną w obwód wtórny, wszelkie zmiany tego strumienia wywołują zaindukowanie się siły elektromotorycznej indukcji w zwojnicy z obwodu wtórnego, a w wypadku, gdy obwód ten jest zamknięty - przepływ prądu indukowanego.

Współczynnik indukcyjności wzajemnej. Indukcyjność zwojnicy, włączonej w obwód wtórny, możemy określić przez obliczenie współczynnika indukcyjności. W tym wypadku nie będzie to jednak współczynnik samoindukcji, a współczynnik indukcyjności wzajemnej, który oznaczamy literą M . Wyznaczyć ten współczynnik możemy na następującej drodze: Strumień magnetyczny, przechodzący przez zwojnicę, włączoną w obwód wtórny,

$$\phi = \frac{4 \pi I z_1 \mu s}{l} \cdot n,$$

gdzie przez z_1 oznaczamy ilość zwojów w zwojnicy, włączonej w obwód pierwotny, a przez n - część strumienia magnetycznego, która przejdzie przez zwojnicę, włączoną w obwód wtórny i którą wyrażamy ułamkiem właściwym.

Stąd strumieniozwoje w zwojnicy, włączonej w obwód wtórny,

$$\phi = z_2 = \frac{4 \pi I z_1 z_2 \mu s}{l} \cdot n.$$

Wzór ten możemy napisać w formie:

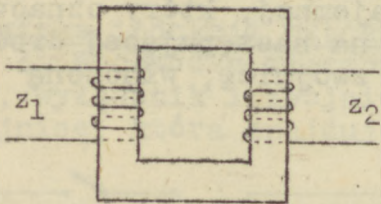
$$\phi_{z_2} = \frac{4 \pi z_1 z_2 \mu s n}{l} \cdot I.$$

Wyrażenie

$$\frac{4 \pi z_1 z_2 \mu s n}{l}$$

oznaczamy literą M i nazywamy współczynnikiem indukcyjności wzajemnej.

Jeżeli chcemy porównać ze sobą współczynnik indukcyjności wzajemnej tych dwóch zwojnic z współczynnikami samoindukcji obu zwojnic, zakładamy, że obie zwojnice nawinęte na rdzeniu żelaznym i że straty strumienia magnetycznego są bardzo małe. W takim wypadku cały strumień magnetyczny ze zwojnic, włączonej w obwód pierwotny, przejdzie przez zwojnicę, włączoną w obwód wtórny, a więc $n = 1$ /rys.103/. Wówczas współczynnik indukcyjności wzajemnej



$$M = \frac{4 \pi z_1 z_2 s}{l}$$

Rys.103. Dwie zwojnice, nawinęte na wspólny rdzeń ferromagnetyczny.

Podnosząc obie strony do kwadratu, otrzymujemy:

$$M^2 = \frac{4^2 \pi^2 z_1^2 z_2^2 s^2}{l^2} = \frac{4 \pi z_1^2 s}{l} \cdot \frac{4 \pi z_2^2 s}{l} = L_1 \cdot L_2.$$

Stąd $M = \sqrt{L_1 L_2}$ /teoretycznie/.

Gdy niecały strumień magnetyczny przejdzie przez zwojnicę, włączoną w obwód wtórny, powiadamy, że nastąpiło rozproszenie strumienia magnetycznego /rys.104 /. Wtedy $M < \sqrt{L_1 L_2}$.

Przykład.

Współczynnik indukcyjności wzajemnej dwóch zwojnic o rdzeniach powietrznych $M = 400 \mu\text{H}$. Gdy przez jedną ze zwojnic przepływa prąd natężeniu 5 A., całkowity strumień, przechodzący przez drugą zwojnicę, wynosi 1000 maxwelli. Obliczyć ilość zwojów w drugiej zwojnicy.

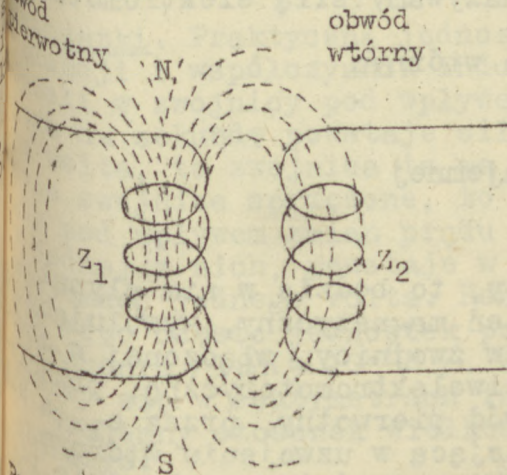
Odpowiedź: 200.

3. Współczynnik sprzężenia. Oznaczmy strumień magnetyczny całkowity, jaki powstanie w zwojnicy, włączonej w obwód pierwotny, przez ϕ_c , a część strumienia, jaka przejdzie przez zwojnicę, włączoną w obwód wtórny, przez ϕ_i . Wtedy, im stosunek

$$\frac{\phi_i}{\phi_c}$$

jest bliższy jedności, tym rozproszenie magnetyczne /czyli rozproszenie strumienia magnetycznego/ jest mniejsze. Stosunek ten oznaczamy literą k i nazywamy współczynnikiem sprzężenia. Z poprzednich wywodów jasno wynika, że współczynnik sprzężenia

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$



rys.104. Rozproszenie strumienia magnetycznego.

W praktyce $k < 1$, bo w obwodach zawsze będziemy mieli pewne przesłonięcie magnetyczne. Gdy $k \rightarrow 1$ /dąży do jedności/, mówimy, że sprzężenie obu obwodów jest silne, gdy zaś $k \rightarrow 0$, mówimy, że sprzężenie jest słabe. Jeżeli sprzężenie chcemy wyrazić nie zwykłym współczynnikiem sprzężenia w formie ułamka właściwego, a przez procentowy współczynnik sprzężenia, należy k pomnożyć przez 100.

4. S.E.M. indukcji wzajemnej. Podobnie jak określiliśmy wielkość siły przeciwelektromotorycznej samoindukcji, tak też określić możemy wartość chwilową siły elektromotorycznej, powstającej w zwojnicy, włączonej w obwód wtórny, siły, którą nazywamy siłą elektromotoryczną indukcji wzajemnej.

Ponieważ strumieniozwoje w obwodzie wtórnym

$$z = M \cdot \frac{dI}{dt},$$

to siła elektromotoryczna indukcji wzajemnej

$$e = kM \cdot \frac{dI}{dt}.$$

Jeżeli obwód wtórny będzie zamknięty, to będzie w nim płynął prąd indukcyjny, który wytworzy strumień magnetyczny, wywołujący powstanie siły przeciwelektromotorycznej w zwojnicy, włączonej w obwód pierwotny. Jeżeli oznaczymy siłę przeciwelektromotoryczną, przeciwdziałającą w zwojnicy, włączonej w obwód pierwotny, przez e_1 , a siłę przeciwelektromotoryczną, przeciwdziałającą w uzwojeniu wtórnym, przez e_2 i odpowiednio prądy indukcyjne: w zwojnicy w obwodzie pierwotnym - I_1 , a w zwojnicy w obwodzie wtórnym - I_2 , to

$$e_1 = -kM \cdot \frac{dI_2}{dt}, \quad \text{a} \quad e_2 = -kM \cdot \frac{dI_1}{dt},$$

gdzie k , tak jak i przy obliczeniu siły przeciwelektromotorycznej samoindukcji, jest współczynnikiem proporcjonalności. Oczywiście jest, że, niezależnie od tego, w obu uzwojeniach powstają siły elektromotoryczne indukcji własnej.

Przykład.

Współczynnik indukcyjności wzajemnej dwóch zwojnic wynosi 500 μH . Prąd w jednej z nich maleje od 1 A. do zera w ciągu 0,000001 sek. Obliczyć siłę elektromotoryczną, jaka się wskutek tego zaindukuje w drugiej zwojnicy.

Odpowiedź: 500 V.

Jednostki. Praktyczną jednostką, którą mierzymy współczynnik samoindukcji i współczynnik indukcji wzajemnej /L i M/, jest henry /H/. Jeżeli w zwojnicy pod wpływem zmian prądu z szybkością jednego ampera na sekundę powstaje siła elektromotoryczna samoindukcji jednego wolta, to zwojnica ta ma indukcyjność jednego henry. Jeżeli mamy dwie zwojnice sprzężone, to mają one indukcyjność jednego henry, gdy pod wpływem zmian prądu z szybkością jednego ampera na sekundę w jednej z nich, powstaje w drugiej siła elektromotoryczna indukcji wzajemnej jednego wolta. Henry jest stosunkowo dużą jednostką, używa się więc często jednostek pochodnych: milihenra /mH = 10^{-3} H/ i mikrohenra / μH = 10^{-6} H/. W układzie c.g.s. /j.e.m./ indukcyjność mierzy się w centymetrach indukcyjności /cmL/.

Wzajemny stosunek wielkości obu tych jednostek możemy łatwo obliczyć:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Henry} &= \frac{1 \text{ wolt}}{1 \text{ amper/sek.}} = \frac{10^8 \text{ j.e.m. siły elektromotorycznej}}{\frac{1}{10} \text{ j.e.m. prądu/sekunda}} = \\ &= 10^9 \frac{1 \text{ j.e.m. siły elektromotorycznej}}{1 \text{ j.e.m. prądu/sek.}} = 10^9 \text{ cmL.} \end{aligned}$$

Przykład.

Obliczyć indukcyjność zwojnicy w cmL, wiedząc, że wynosi ona 2000 μ H.

Odpowiedź: 2×10^6 cmL.

R o z d z i a ł 3.

Łączenie zwojnic. Wariometr. Bifilarność.

Typy zwojnic, spotykanych w praktyce.

1. Łączenie zwojnic. Zwojnice, tak jak i opory, możemy ze sobą łączyć. Rozróżniamy połączenia zwojnic szeregowo i równoległe, przy czym zwojnice mogą być ze sobą łączone tak, że indukcja wzajemna pomiędzy nimi nie zachodzi, i tak, że indukcja wzajemna pomiędzy nimi zachodzi. Jeżeli rozpatrzmy wypadek połączenia szeregowego zwojnic, których indukcja wzajemna nie zachodzi /rys.105/, to, na podstawie pierwszego prawa Kirchhoffa, przez każdą z tych zwojnic płynie ten sam prąd I. A więc strumieniozwoje w poszczególnych zwojnicach wynoszą odpowiednio $L_1 I$, $L_2 I$ i $L_3 I$. A zatem suma strumieniozwojów

$$\phi_{z/c} = I / L_1 + L_2 + L_3 /.$$

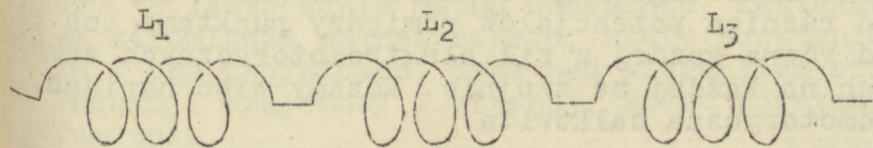
Stąd też indukcyjność zastępcza /całkowita/, w której powstałyby takie same strumieniozwoje $/L_c \cdot I/$, wynosi

$$L_c = L_1 + L_2 + L_3.$$

Jak więc widzimy, indukcyjność całkowitą układu obliczymy tu zupełnie podobnie, jak oporność całkowitą układu oporów, połączonych szeregowo.

Gdy kilka zwojnic jest połączonych równoległe /rys.106/, przy

W tym przypadku, jeżeli żadna z nich nie jest z drugą sprzężona, to całkowitą indukcyjność tego układu obliczyć możemy, rozpatrując siły przeciwelektromotoryczne, które pod wpływem zmian natężenia prądu powstaną w poszczególnych zwojnicach. Całkowity prąd I , płynący w obwodzie, rozgałęzi się w punkcie A. Wiemy, że na mocy pierwszej zasady Kirchhoffa

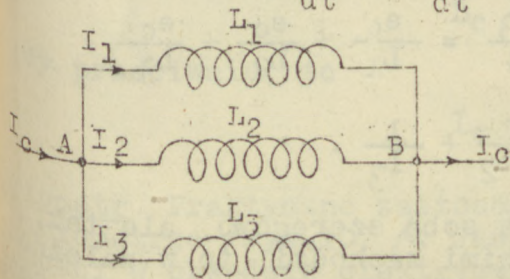


Rys.105. Połączenie szeregowe zwojnic, w których indukcja wzajemna nie zachodzi.

$$I_c = I_1 + I_2 + I_3.$$

Odpowiednio i szybkość zmian prądu całkowitego

$$\frac{dI_c}{dt} = \frac{dI_1}{dt} + \frac{dI_2}{dt} + \frac{dI_3}{dt}.$$



W poszczególnych zwojnicach pod wpływem zmian natężenia poszczególnych prądów zaindukują się siły elektromotoryczne:

$$e_1 = L_1 \frac{dI_1}{dt},$$

$$e_2 = L_2 \frac{dI_2}{dt} \quad \text{i} \quad e_3 = L_3 \frac{dI_3}{dt},$$

Rys.106. Połączenie równoległe zwojnic, w których indukcja wzajemna nie zachodzi.

przyjmując, że jednostki są tak dobrane, że współczynnik

proporcjonalności $k = 1$ i że nie badamy kierunku działania poszczególnych sił przeciwelektromotorycznych samoindukcji, a bierzemy pod uwagę tylko ich wartość bezwzględną. Ponieważ zwojnice połączone są sobą równolegle, to różnica potencjałów pomiędzy punktami ich połączeń A i B musi być równa każdej z sił elektromotorycznych samoindukcji, powstających na każdej ze zwojnic. Możemy więc napisać, siła przeciwelektromotoryczna całkowita

$$e_c = L_1 \frac{dI_1}{dt} = L_2 \frac{dI_2}{dt} = L_3 \frac{dI_3}{dt}.$$

Jakaś indukcyjność zastępcza L_c włączona w ten obwód, powinna więc wywołać powstanie takiej samej siły przeciwelektromotorycznej e_c , jeśli zajdzie w niej zmiana natężenia prądu całkowitego I_c .

A więc

$$e_c = L_c \frac{dI_c}{dt}.$$

$$\text{Stąd } \frac{e_c}{L_c} = \frac{dI_c}{dt} = \frac{dI_1}{dt} + \frac{dI_2}{dt} + \frac{dI_3}{dt} = \frac{e_c}{L_1} + \frac{e_c}{L_2} + \frac{e_c}{L_3}.$$

Więc

$$\frac{1}{L_c} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}.$$

Jeśli dwie zwojnice połączone są ze sobą szeregowo, ale tak, że zjawisko indukcji wzajemnej pomiędzy nimi zachodzi, to w zależności od tego, czy zwojnice te mają uzwojenia, nawinięte w kierunku zgodnym, czy przeciwnym, indukcyjność całkowita układu wyniesie

$$L_c = L_1 + L_2 + 2M$$

wypadku, gdy uzwojenia zwojnic L_1 i L_2 nawinięte są w jednym kierunku, lub

$$L_c = L_1 + L_2 - 2M,$$

jeżeli uzwojenia obu zwojnic nawinięte są w kierunkach przeciwnych. Wzory te łatwo sobie można uzasadnić, zastanawiając się nad kierunkiem strumienia magnetycznego, który powstanie w jednym i drugim wypadku w obu zwojnicach, oraz nad kierunkiem sił elektromotorycznych indukcji wzajemnej i własnej, które powstaną wskutek zmian tego strumienia.

Sprawa się nieco komplikuje, gdy mamy dwie zwojnice, połączone ze sobą równolegle, w których zachodzi zjawisko indukcji wzajemnej. Tak jak i poprzednio, z prawa Kirchhoffa obliczyć możemy, że

$$L_c = \frac{L_1 \cdot L_2 - M^2}{L_1 + L_2 \pm 2M},$$

przy czym, gdy obie zwojnice nawinięte są zgodnie, to

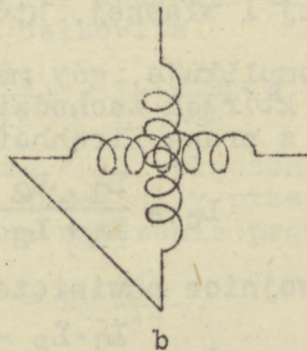
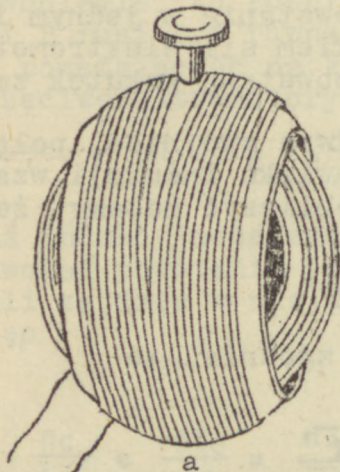
$$L_c = \frac{L_1 \cdot L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M},$$

a gdy przeciwnie, to

$$L_c = \frac{L_1 \cdot L_2 - M^2}{L_1 + L_2 + 2M}.$$

Wariometr. Praktyczne zastosowanie tego rodzaju połączeń znajdują się w wariometrze /rys.107/. Jest to przyrząd, służący do zmiany indukcyjności w obwodzie elektrycznym. Składa się on z dwóch zwojnic, przy czym jedna z nich jest umieszczona w drugiej tak, że może być względem niej obrócona o 180° . Obie zwojnice mogą być połączone albo szeregowo, albo równolegle. Gdy dwie zwojnice znajdują się w jednej płaszczyźnie, to ich strumienie magnetyczne mogą być albo zgodne,

albo przeciwne co do kierunku. Jasne jest, że indukcyjność obwodu wzrośnie, gdy strumienie magnetyczne, powstające w obu zwojnicach są co do kierunku zgodne. Gdy zwojnica wewnętrzna zostanie obrócona



Rys.107. a. Wariorometr.

b. Oznaczenie konwencjonalne wariorometru na schematach.

Jeżeli założymy, że rozproszenia strumienia niema i że zwojnice nawinęliśmy tak, że $L_1 = L_2$, to

$$L_c = L_1 + L_1 + 2L_1 = 4L_1$$

i, po obróceniu zwojnicy wewnętrznej o 180° ,

$$L_c = L_1 + L_1 - 2L_1 = 0.$$

o 180° , wtedy oba strumienie magnetyczne wzajemnie się zniosą i układ ten praktycznie możemy uważać za bezindukcyjny. W ten sposób indukcyjność tego układu możemy przy obracaniu zwojnicy wewnętrznej zmieniać stopniowo od zera do maximum, ponieważ przez to zmieniamy zarazem współczynnik indukcyjności wzajemnej

$$0 \leq L_c \leq L_1 + L_2 +$$

Gdy zwojnice połączone są ze sobą równoległe, to, jak już wiemy,

$$L_c = \frac{L_1 \cdot L_2 - M^2}{L_1 + L_2 \pm 2M}$$

Gdy $M = L_1 = L_2$, to

$$L = \frac{L_1^2 - L_1^2}{L_1 + L_1 \pm 2L_1} = 0$$

Gdy wewnętrzną zwojnicę obrócimy tylko o 90° , to sprzężenie wypadku idealnym wyniesie 50%. Wtedy

$$L_c = \frac{\left(L_1^2 - \frac{L_1^2}{2}\right)}{L_1 + L_1 + L_1}$$

Stąd

$$L_c = \frac{L_1}{4}$$

Odpowiednio, przy obróceniu zwojnicy wewnętrznej o 90° w drugą stronę,

$$L_c = \frac{3L_1}{4}$$

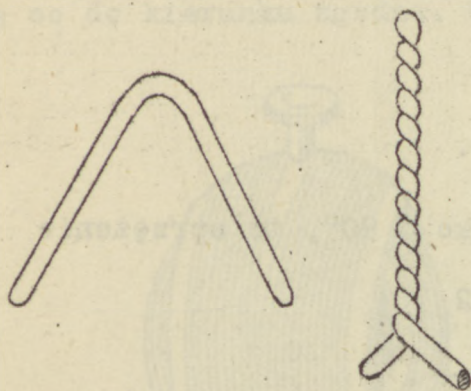
Oczywiście, praktycznie nigdy $M \neq L_1$, więc praktyczny zakres nie będzie się dokładnie zawierał w granicach $0 \leq L_c \leq L_1$.

Znacznie częściej spotyka się wariometry, w których obie zwojnice połączone są ze sobą szeregowo, ponieważ zmiana indukcyjności całkowitej układu może teoretycznie w tego typu wariometrach zachodzić w granicach

$$0 \leq L_c \leq 4L_1$$

czyli w o wiele szerszym zakresie.

3. Bifilarność. Bardzo często przy nawijaniu oporów drutowych lub związaniu kondensatorów rurkowych chodzi nam o to, aby nie występ

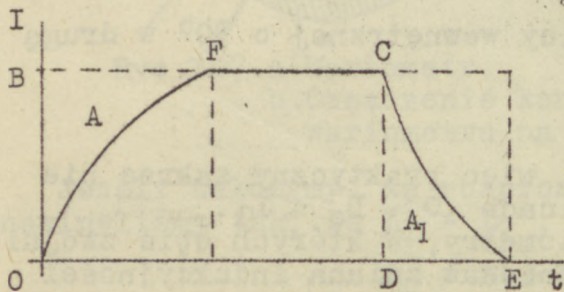


wała w nich żadna indukcyjność. W tym celu stosujemy tzw. nawijanie bifilarne /rys.108/. W przewodniku, związonym w ten sposób, strumień magnetyczny, jaki powstanie przy przepływie prądu przez jedną z jego gałęzi, przeciwdziała strumieniowi magnetycznemu, jaki powstaje dzięki przepływowi prądu przez drugą jego gałąź.

Podobnie nawija się opory drutowe i podobnie związa się kondensatory rurkowe

Rys.108. Bifilarnie związany przewodnik.

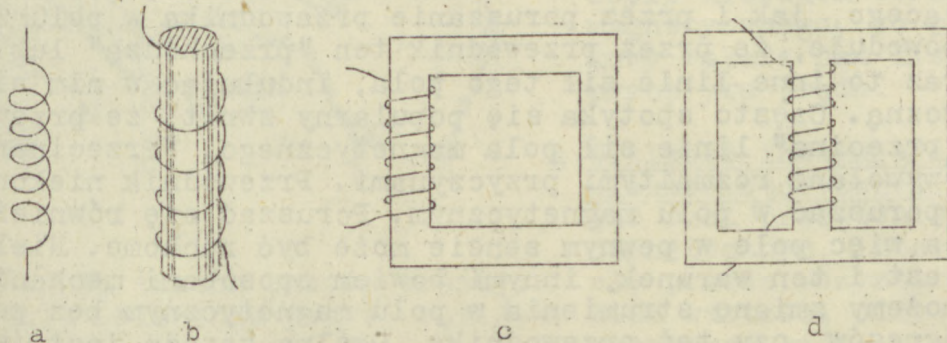
4. Zamiana energii elektrycznej na magnetyczną. Omawialiśmy już szczegółowo kwestię powolnego narastania i powolnego maleńcia prądu w obwodzie, w który włączona jest jakaś indukcyjność. Spójrzmy teraz na rys.109. Jeżeli wyobrazimy sobie, że zamiast prądu narastającego powoli i powoli malejącego, mamy prąd, płynący w obwodzie bezindukcyjnym /odcinek BC/, to energia elektryczna, przejawiająca się w obwodzie przy przepływie prądu, musi się równać energii, przejawiającej się przy przepływie samego prądu w obwodzie o pewnej indukcyjności. Jeżeli więc prostok



Rys.109. Wykres energii, zawartej w polu magnetycznym zwojownicy.

BCDO daje nam obraz energii, przejawiającej się przy przepływie prądu w obwodzie bezindukcyjnym, to powierzchnia BCDO równa się powierzchni OFCE. Zachodzi zatem pytanie, gdzie się podziela energia, zobrażowana polem OBF i skąd się wzięła energia, odpowiadająca powierzchni CDE. Otóż przy narastaniu prądu energia ta została zużyta na stworzenie pola magnetycznego, przez które została ona zwrócona obwodowi w czasie malenia natężenia prądu, zgodnie z dotychczas omówionymi zasadami.

Rzeczy zwojnic, spotykane w praktyce. Kilka najpospolitszych rodzajów zwojnic podanych jest na rys.110 a, b, c i d.



Rys.110. Kilka najpospolitszych rodzajów zwojnic.

MASZYNY ELEKTRYCZNE.

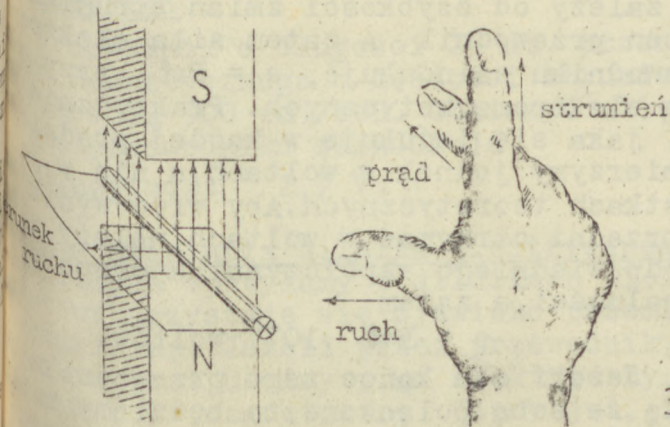
R o z d z i a ł 1.

Zasada działania maszyn elektrycznych.

1. Ruch przewodnika w polu magnetycznym. Rozpatrywaliśmy dotychczas zagadnienie zaindukowania się siły elektromotorycznej w przewodniku nieruchomym. Zajmiemy się teraz kwestią powstawania siły elektromotorycznej w przewodniku, poruszającym się w polu magnetycznym. W zasadzie zaindukowanie się siły elektromotorycznej w jakimkolwiek przewodniku uwarunkowane jest zmianą strumienia magnetycznego. Zmianę tę uzyskać można zarówno przez zmianę natężenia prądu, ten strumień wytwarzającego, jak i przez poruszanie przewodnika w polu magnetycznym, co powoduje, że przez przewodnik ten "przechodzą" lub "przechodzą" coraz to inne linie sił tego pola, indukując w nim siłę elektromotoryczną. Często spotyka się popularny zwrot, że przewodnik w ruchu "przecina" linie sił pola magnetycznego. "Przecinanie" może być wywołane rozmaitymi przyczynami. Przewodnik niekoniecznie musi się poruszać w polu magnetycznym. Poruszać się również mogą magnesy, a więc pole w pewnym sensie może być ruchome. Niekoniecznie zresztą jest i ten warunek, innymi bowiem sposobami mechanicznymi wywołać możemy zmianę strumienia w polu magnetycznym bez poruszania czy to magnesów, czy też przewodnika. Ogólna zasada jest jednak ta sama we wszystkich wypadkach i stanowi zasadę działania prądnic, czyli maszyn, służących do wytwarzania siły elektromotorycznej drogą przemiany energii mechanicznej na elektryczną.
2. Reguła trzech palców prawej ręki /reguła Fleminga prawej ręki/. Spójrzmy na rys. 111, na którym mamy parę biegunów magnetycznych, między którymi poruszany jest przewodnik w poprzek w kierunku, oznaczonym

przez strzałkę.

Strumień magnetyczny w tym polu działa, jak wiemy, w kierunku od bieguna N do bieguna S. Kierunek siły elektromotorycznej, która się indukuje w tym przewodniku, określa nam tzw. reguła trzech palców prawej ręki /reguła Fleminga prawej ręki/. Jeżeli kciuk, palec wskazujący i palec środkowy ręki prawej ułożymy względem siebie prostopadłe, jak na rysunku, i to w ten sposób, aby kciuk wskazywał nam kierunek ruchu przewodnika, a palec wskazujący - kierunek linii sił pola magnetycznego, czyli kierunek strumienia magnetycznego, to palec środkowy wskaże nam kierunek przepływu prądu.



Rys. 111. Reguła trzech palców prawej ręki /Reguła Fleminga prawej ręki/.

szonym przewodniku zaindukuje. Jeżeli oznaczymy szybkość, z jaką się przewodnik w tym polu porusza przez v cm/sek., a długość czynną tego przewodnika, tj. tę część przewodnika, która bierze udział w procesie przecinania linii sił pola magnetycznego, przez l , to w ciągu jednej sekundy przewodnik ten przebędzie powierzchnię vl cm².

3. Wielkość indukującej się siły elektromotorycznej. Rozpatrując ruch przewodnika w polu magnetycznym, interesujemy się przede wszystkim zagadnieniem wartości siły elektromotorycznej, która się w poru-

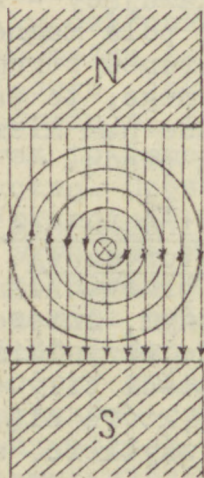
Wiemy, że gęstość strumienia magnetycznego wynosi B Maxwella, a strumień magnetyczny $\phi = Bs$, gdzie s jest powierzchnią, przebywającą przez przewodnik w ciągu 1 sek. Ponieważ $s = v l$, więc $\phi = Bs = Bvl$. Wynika z tego, że przewodnik, przechodząc przez pole magnetyczne, przecina Bvl linii sił pola magnetycznego.

Mówiliśmy już o tym, że wielkość siły elektromotorycznej, jaką się zaindukuje w przewodniku, zależy od szybkości zmian strumienia magnetycznego, obejmującego ten przewodnik. A zatem siła elektromotoryczna, jaka się w tym przewodniku zaindukuje, $e = Bvl$, przy czym wynik otrzymamy w jednostkach elektromagnetycznych. Praktycznie wielkość siły elektromotorycznej, jaka się indukuje w każdej prądnic

mierzymy jednak w woltach, a nie w jednostkach teoretycznych. Aby więc wynik przedni otrzymać w woltach, należy użyć odpowiedniego współczynnika proporcjonalności, a zatem

$$e = Bvl \cdot 10^{-8} \text{ woltów.}$$

Jeżeli oba końce tego przewodnika łączy się ze sobą połączone, to będziemy mieli obwód zamknięty, w którym, pod wpływem zaindukowania się siły elektromotorycznej, popłynie prąd elektryczny w kierunku, zgodnym z kierunkiem działania siły elektromotorycznej. Wobec tego w przewodniku powstanie pole magnetyczne, które z jednej strony będzie zgodne do kierunku z liniami sił pola magnetycznego pomiędzy obydwoma biegunami, a z drugiej strony - przeciwne /rys.112/.



Rys.112. Przewodnik, w którym płynie prąd, umieszczony w stałym polu magnetycznym.

Wskutek tego zjawiska powstanie z jednej strony przewodnika zagęszczenie linii sił pola magnetycznego, a z drugiej strony - rozrzedzenie; na przewodnik będą więc działały siły magnetyczno-mechaniczne /zwane siłami elektrodynamicznymi /, które będą dążyły do przesunięcia go w kierunku przeciwnym do kierunku pierwotnego ruchu.

Mamy tutaj wybitnie mechaniczny przejaw praktycznych objawów, wykazujących z reguły Lenza.

Przykład.

Przewodnik o długości 25 cm. przecina pod kątem prostym linie sił pola magnetycznego o gęstości strumienia $B = 12000 \text{ maxwelli/cm}^2$. z szybkością 900 cm./sek. Obliczyć siłę elektromotoryczną, jaka się w tym przewodniku zaindukuje.

Odpowiedź: 2,7 V.

Zasada działania silnika elektrycznego. Wykorzystanie sił elektrodynamicznych spotykamy w silnikach elektrycznych, tj. maszynach, w których wykorzystuje się zjawisko przemiany energii elektrycznej na mechaniczną. Jeżeli przez przewodnik, znajdujący się w polu magnetycznym, przepuścimy prąd elektryczny, to wokół tego przewodnika powstanie pole magnetyczne. Wiemy już, że z jednej strony tego przewodnika linie sił obu tych pól magnetycznych dodadzą się, a z drugiej - odejmą, wskutek czego z jednej strony przewodnika nastąpi ich zagęszczenie, a z drugiej - rozrzedzenie i w rezultacie przewodnik poruszy się w kierunku, oznaczonym na rys.113 strzałką, ponieważ linie sił pola magnetycznego dążą do wyprostowania się, a z jednej strony przewodnika występuje ich przewaga, wywołująca jego ruch w określonym kierunku. Kierunek ten może być każdorazowo ustalony tzw. regułą trzech palców lewej ręki /reguła Fleminga lewej ręki /, zobrazowaną na tym samym rysunku. Jeżeli kciuk, palec wskazujący i palec środkowy ułożymy, jak na rysunku, prostopadle względem siebie i to tak,

aby palec środkowy wskazywał nam kierunek przepływającego przez przewodnik prądu, a palec wskazujący - kierunek strumienia magnetycznego, to kciuk wskaże nam wtedy kierunek ruchu przewodnika w polu magnetycznym.

Wielkość siły mechanicznej, która powstanie w tym polu magnetycznym, określona jest wzorem

$$F = BI\ell,$$

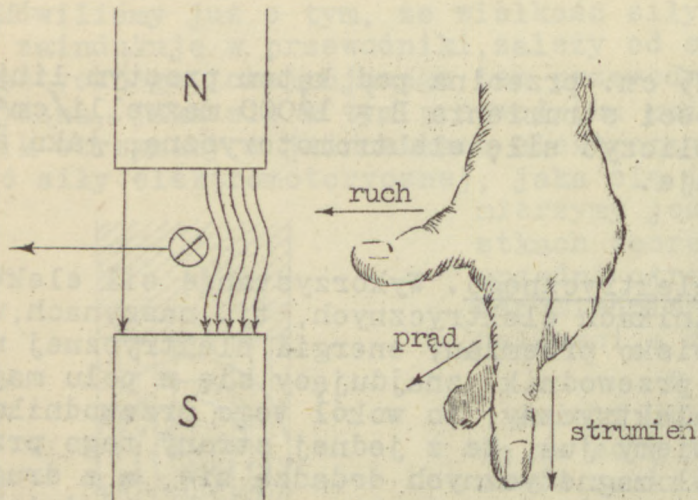
gdzie B jest indukcją magnetyczną, I oznacza prąd przepływający przez przewodnik, a ℓ - jego długość czynną. Zwykle jednak natężenie prądu, przepływającego przez ten przewodnik podane jest w amperach, czyli jednostkach praktycznych. Aby więc otrzymać siłę w dynach, czyli jednostkach teoretycznych, musimy użyć odpowiedniego współczynnika proporcjonalności. A zatem

$$F = \frac{BI\ell}{10} \text{ dyn.}$$

Reasumując, w urządzeniach, które służą nam do wytwarzania

siły elektromotorycznej, czyli w prądnicach, dla określenia jej kierunku stosujemy regułę trzech palców prawej ręki, /regułę Fleminga/, a dla obliczenia jej wartości - wzór:

$$e = Bv\ell \cdot 10^{-8} \text{ woltów.}$$



Rys.113. Reguła trzech palców lewej ręki.

Do wyznaczenia kierunku ruchu w maszynach, służących do zamiany energii elektrycznej na mechaniczną, używamy reguły Fleminga lewej ręki /trzech palców/, przy czym wartość tej siły mechanicznej każdorazowo obliczyć możemy z wzoru:

$$F = \frac{BIl}{10} \text{ dyn.}$$

Przykład.

Przez przewodnik, przecinający pod kątem prostym linie sił pola magnetycznego o gęstości strumienia 10.000 maxwelli/cm², przepływa prąd o natężeniu 5 A. Obliczyć siłę mechaniczną, działającą na ten przewodnik, wiedząc, że długość jego wynosi 20 cm.

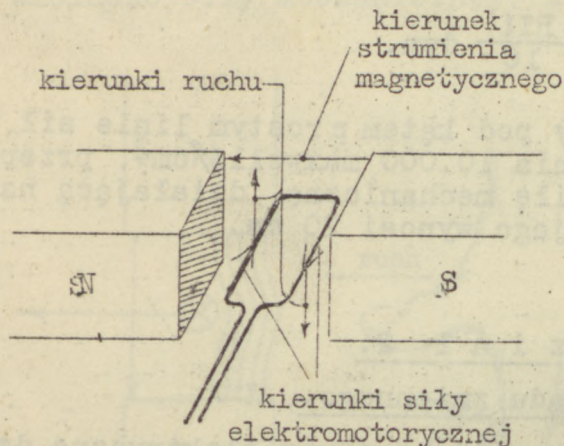
Odpowiedź: 100.000 dyn.

R o z d z i a ł 2.

Prądnicą prądu zmiennego.

1. Podział maszyn elektrycznych. Wszystkie maszyny elektryczne dzielimy na prądnice czyli generatory, tj. maszyny, służące do wytwarzania siły elektromotorycznej, i silniki, tj. maszyny, służące do wytwarzania napędu mechanicznego pod wpływem przyłożonego napięcia. Zależnie od rodzaju wytworzonej siły elektromotorycznej w prądnicach, a przyłożonego napięcia w silniku, maszyny elektryczne dzielimy na maszyny prądu stałego i maszyny prądu zmiennego. Specjalny rodzaj maszyn stanowią przetwornice, które zostaną jeszcze omówione. Obecnie rozpoczniemy od zbadania zasady działania prądnic prądu zmiennego, zwanych również alternatorami.

2. Zasada działania prądnicy prądu zmiennego. Na rys.114 mamy zwoj, obracający się w polu magnetycznym. Z poprzednich rozważań wiemy, że, zgodnie z regułą Fleminga trzech palców prawej ręki, w lewej



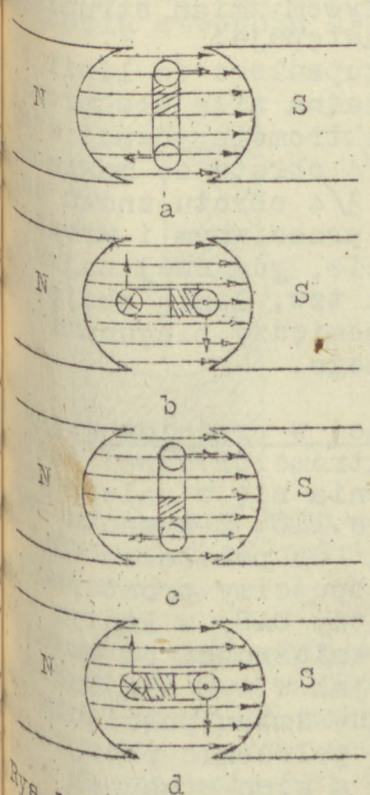
Rys.114. Zwoj, obracający się w polu magnetycznym.

wartości strumienia magnetycznego uzyskana jest przez obracanie zwoju w polu magnetycznym, a więc przez zmianę jego położenia w stosunku do linii sił pola magnetycznego, ten zwoj obejmującego. Spójrzmy teraz na rys.115. W położeniu a obrócenie zwoju o jakiś mały kąt nie wpłynie zupełnie na zmianę ilości linii sił, przezeń przechodzących. Wartość strumienia magnetycznego pozostaje niezmienną, a więc w zwoju tym nie zaindukuje się żadna siła elektromotoryczna. Zauważyć należy, że w tym wypadku zwoj znajduje się w położeniu prostopadłym do linii sił pola magnetycznego. W miarę, gdy zwoj

części tego zwoju zaindukuje się siła elektromotoryczna o kierunku przeciwnym do siły elektromotorycznej, która zaindukuje się w prawej części zwoju. Ponieważ jednak zwoj jest zamknięty, kierunki obu zaindukowanych sił elektromotorycznych będą w samym zwoju zgodne i dodadzą się, dając pewną różnicę potencjałów na obojczykach tego zwoju. Kierunki strumienia magnetycznego, ruchu i prądu podane są na rysunku.

Wiemy już, że wielkość zaindukowanej siły elektromotorycznej zależy od szybkości zmian strumienia magnetycznego, obejmującego ten zwoj. W tym wypadku ta zmiana

... będziemy obracać w prawo. /rys.115 b/, zmiana położenia zwoju o pe-
 ... wien kąt w stosunku do położenia poprzedniego spowoduje stopniowe



Rys.115. Stopniowe obra-
 cenie zwoju w polu mag-
 netycznym.

zmniejszanie się ilości linii sił, przechodzących przez ten zwoj, przy czym im zwoj ten będzie bliżej położenia równoległego w stosunku do linii sił pola magnetycznego, tym szybkość zmian strumienia magnetycznego będzie większa. W położeniu obecnym bowiem, tj. w położeniu, przesuniętym o 90° w stosunku do położenia poprzedniego, wystarczy obrócenie zwoju o mały nawet kąt, aby ilość linii sił, przez ten zwoj przechodzących, znacznie się zmieniła. W miarę, gdy będziemy teraz obracali zwoj w dalszym ciągu w prawo, sytuacja się odwróci, zmiana bowiem położenia zwoju o pewien kąt wywoływać będzie coraz to mniejszą zmianę w ilości linii sił, przechodzących przez ten zwoj, aż wreszcie zwoj nasz dojdzie do położenia jak na rys. 115 c, w którym znów przesunięcie go o mały kąt nie wywołuje żadnej zmiany w ilości linii sił, przez ten zwoj przechodzących. Jak więc widzimy, szybkość zmian strumienia magnetycznego, przechodzącego przez nasz zwoj, zmienia się w ciągu jednego półobrotu od zera do swej największej wartości przy odchyleniu o 90° i z powrotem do zera.

Gdy teraz zwoj będziemy obracać w dalszym ciągu w tym samym kierunku /rys.115 d/,

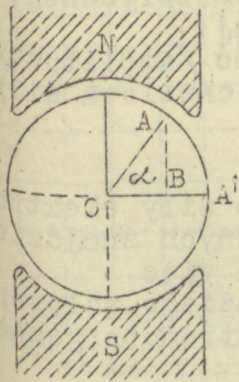
to znów szybkość zmian strumienia będzie rosła, ale pod jej wpływem siła elektromotoryczna, która się zaindukuje w przewodniku, będzie już teraz miała kierunek przeciwny do poprzedniego.

Reasumując, możemy opisać kompletny cykl zmian wartości siły elektromotorycznej, zaindukowanej w zwoju pod wpływem zmian strumienia magnetycznego, przezeń przechodzącego, jak następuje:

Począwszy od położenia początkowego, prostopadłego do linii sił pola magnetycznego, położenia, w którym się żadna siła elektromotoryczna w zwoju nie indukuje, wartość siły elektromotorycznej stopniowo wzrasta w jednym kierunku, dochodząc po $1/4$ obrotu do maximum, poczym, po $1/2$ obrotu, opada do zera, aby po $3/4$ obrotu znowu do swojej największej wartości, ale w kierunku przeciwnym i wreszcie po całym obrocie, znów opaść do zera w momencie, gdy zwój zajmie swoje położenie początkowe, pokrywające się z tzw. linią obojętną. Linia ta znajduje się na połowie odległości pomiędzy biegunami i jest prostopadła do linii sił pola magnetycznego.

3. Wartość indukującej się siły elektromotorycznej w prądnicu prądu zmiennego. Widzimy więc, że wartość siły elektromotorycznej jest dla każdego chwilowego położenia zwoju i zmienia się w zależności od zmiany kąta obrotu α , uwidocznionego na rys. 116. Z rysunku widzimy, że zwój przesunął się z położenia OA' do położenia OA , taczając pewien łuk. Jeżeli teraz z punktu A opuszczimy prostopadłą na promień OA' , to otrzymamy trójkąt prostokątny OAB , w którym długość dwóch jego boków będzie się zmieniała w zależności od zmian kąta obrotu. Jeżeli zastanowimy się nad tym, jak w tym trójkącie zmienia się stosunek boku AB do boku OA w miarę zmian położenia zwoju, to przekonamy się, że gdy zwój zajmie swe położenie początkowe na linii obojętnej, bok AB będzie równy zeru, a więc stosunek AB do boku OA też będzie równy zeru. Gdy zwój zajmie położenie prostopadłe do linii obojętnej, punkt B pokryje się z punktem O , a odcinek AB pokryje się z odcinkiem AO . W tym położeniu zwoju odcinek

... będzie równy odcinkowi AO, a więc stosunek ich będzie równy jedności. Zatem stosunek obu tych boków trójkąta prostokątnego AOB zmienia się tak, jak wartość siły elektromotorycznej, z czego wynika, że chwilowa jej wartość przy każdym położeniu zwoju może być zmierzona wartością stosunku obu boków tego trójkąta. Bok AO, który w trójkącie prostokątnym AOB leży naprzeciw kąta prostego, nazywamy przeciwprostokątną. Pozostałe boki tego trójkąta AB i OB, jako przyległe do kąta prostego w tym trójkącie, nazywamy przyprostokątnymi. Biorąc pod uwagę kąt α , rozróżniamy, mówiąc o obu przyprostokątnych w tym trójkącie, przyprostokątną przyległą do tego kąta, i przyprostokątną przeciwną do tego kąta, i przyprostokątną przyległą do kąta α ; jest w tym trójkącie bok OB, a przyprostokątną przeciwną do kąta α - bok AB. Stosunek przyprostokątnej, przeciwną do kąta α do przeciwprostokątnej nazywa się sinusem tego kąta. W tym trójkącie sinus kąta



rys. 116. Zmiana kąta α w zależności od położenia zwoju.

α jest $\frac{AB}{OA}$. Sinus kąta α pisze się w skrócie $\sin \alpha$.

Jeżeli zanalizujemy teraz zmianę wielkości boku AB w trójkącie AOB w miarę obracania zwoju, to zobaczymy, że ten od zera w początkowym położeniu zwoju wzrasta po 1/4 obrotu do swej wartości maksymalnej, po czym po 1/2 obrotu maleje do zera, aby po 3/4 obrotu znów wzrosnąć do maximum, ale w kierunku przeciwnym, i wreszcie, po całym obrocie, znów zmaleć do zera. Widzimy więc, że wielkość boku AB zmienia się identycznie, jak i siła elektromotoryczna, możemy więc wartość siły elektromotorycznej w każdej

chwili mierzyć wielkością boku AB. Skądinąd wiemy już, że

$$\frac{AB}{OA} = \sin \alpha,$$

stąd więc

$$AB = OA \sin \alpha.$$

OA odpowiada największej wartości siły elektromotorycznej; wartość tę nazywamy amplitudą siły elektromotorycznej.

Jeżeli oznaczymy sobie teraz największą wartość /amplitudę/ siły elektromotorycznej zmiennej przez \mathcal{E} , to wartość chwilowa siły elektromotorycznej e da się wyrazić wzorem:

$$e = \mathcal{E} \sin \alpha.$$

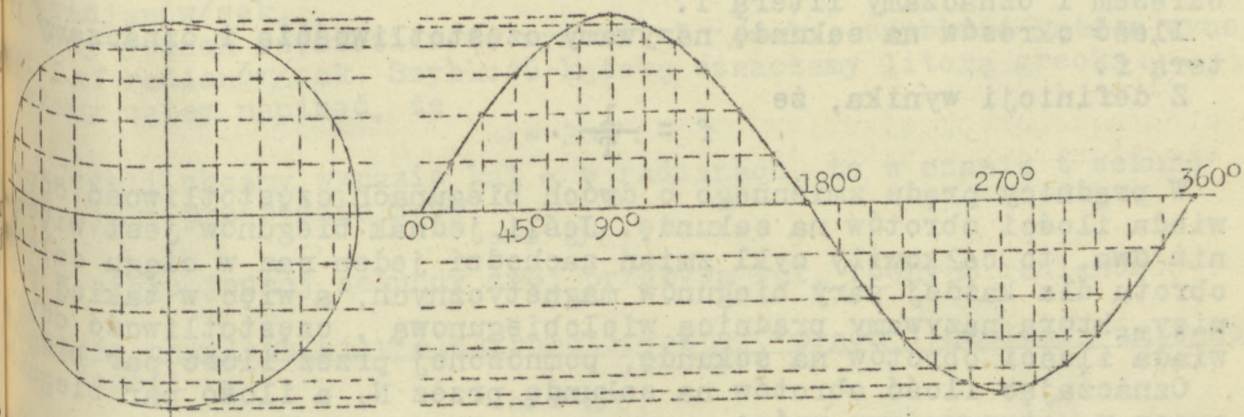
Przykładowo, przyjmując za największą wartość siły elektromotorycznej $\mathcal{E} = 100$ V., z dowolnych tablic matematycznych znajdziemy np. po $1/8$ obrotu /tj. $\alpha = 45^\circ$ /, $\sin \alpha = 0,707$, a więc $e = 100$ V. \times $0,707 = 70,7$ V. W ten sposób, dla każdego położenia zwoju, możemy obliczyć chwilową wartość siły elektromotorycznej.

4. Graficzna metoda przedstawienia siły elektromotorycznej zmiennej.

Zmianę wartości siły elektromotorycznej przedstawia się bardzo łatwo na wykresie, który się robi w sposób następujący:

Na przedłużeniu linii obojętnej /rys.117 / odkładamy odcinek, równy obwodowi koła, po którym zwoj nasz się porusza. Odcinek ten podzielić możemy na działki, z których każda odpowiada 15 stopniom. Oczywiście jest, że cały ten odcinek zostanie podzielony na 360° , równy jest obwodowi koła. Na obwodzie samego koła wyznaczamy odpowiednie położenie naszego zwoju co 15° i z otrzymanych w ten sposób punktów wyprowadzamy równoległe do linii objętej aż do miejsc, z których możemy opuścić prostopadłe na podzielony poprzednio odcinek. W ten sposób otrzymamy w tych punktach, które odpowiadają w stopniach kątowi obrotu

zwoju w danym momencie. Powstałe na tej drodze punkty możemy połączyć ciągłą linią krzywą, otrzymując obraz zmian siły elektromotorycznej w ciągu całego obrotu. Zaznaczyć należy, że odcinek, który został podzielony na stopnie, może być również podzielony na jednostki czasu /np. na jakies ułamki sekundy /,bo, przy stałej szybkości



Rys.117. Metoda wykreślenia wartości siły elektromotorycznej zmiennej.

obrotów, zmiana wartości siły elektromotorycznej następuje w regularnych odstępach czasu. Całkowitą zmianę wartości siły elektromotorycznej od zera do wartości najwyższej, a następnie, poprzez zero, do najwyższej wartości w kierunku przeciwnym i z powrotem do zera, nazywamy cyklem zmian siły elektromotorycznej, o czym już zresztą wspominaliśmy. Tego rodzaju wykres siły elektromotorycznej nazywamy wykresem sinusoidalnym, ponieważ wykres wartości sinusa kąta α wyglądałby identycznie.

5. Pojęcie okresu, częstotliwości i szybkości kątowej. Jeżeli zwoj jest obracany szybko, to cykli na sekundę może przypadać więcej, jeden.

Czas, potrzebny na przebieg jednego pełnego cyklu zmian siły elektromotorycznej / albo też prądu lub napięcia zmiennego /, nazywamy okresem i oznaczamy literą T.

Ilość okresów na sekundę nazywamy częstotliwością i oznaczamy teraz f.

Z definicji wynika, że

$$f = \frac{1}{T} .$$

W prądniccy prądu zmiennego o dwóch biegunach częstotliwość odpowiada ilości obrotów na sekundę. Jeśli jednak biegunów jest więcej niż dwa, to całkowity cykl zmian zachodzi jeden raz w ciągu całego obrotu dla każdej pary biegunów magnetycznych, a więc w takiej prądniccy, którą nazywamy prądnicą wielobiegunową, częstotliwość odpowiada ilości obrotów na sekundę, pomnożonej przez ilość par biegunów.

Oznaczając ilość obrotów na sekundę przez N, a ilość par biegunów przez p, otrzymujemy wzór:

$$f = Np,$$

gdzie f oznacza nam częstotliwość zmian siły elektromotorycznej.

Kąt obrotu zwoju możemy wyrazić albo w stopniach, albo w radianach. Radian jest to kąt, opierający się na łuku, równym promieniowi. W pełnym kole będzie zatem tyle radianów, ile promieni zawiera się w obwodzie koła, a więc 2π . Jeden radian odpowiada zatem

$$\frac{360^\circ}{2\pi} = 57^\circ 24' .$$

Szybkość obrotu zwoju w polu magnetycznym możemy wyrazić szybkością liniową, tj. w cm/sek., co jest w tym wypadku niewygodne, kątową, tj. w stopniach/sek. Jeżeli częstotliwość jest duża, to

Wycie stopni dla wyrażenia szybkości kątowej doprowadziłoby do astronomicznych cyfr. Zamiast stopni lepiej jest więc używać radianów, które są jednostkami znacznie większymi. Gdyby częstotliwość wyniosła 1 okres na sek. /1~/sek./, szybkość kątowa wyniosłaby 2π radianów/sek.

Gdy jednak częstotliwość wynosi f~/sek., szybkość kątowa wynosi 2πf radianów/sek. Szybkość kątową oznaczamy literą grecką ω. Możemy zatem napisać, że

$$\omega = 2\pi f.$$

Jeżeli chcemy wyrazić kąt α w radianach, to w czasie t sekund kąt, jaki przebędzie zwój,

$$\alpha = \omega t,$$

to w ciągu jednej sekundy zwój przebywa kąt, równy ω radianów.

Wartość chwilowa siły elektromotorycznej, prądu i napięcia zmiennej. Jeżeli

$$\alpha = \omega t,$$

to wartość chwilowa siły elektromotorycznej e możemy wyrazić wzorem:

$$e = \xi \sin \omega t.$$

Z prawa Ohma wynika, że prąd, jaki popłynie w obwodzie pod wpływem siły elektromotorycznej zmiennej, będzie miał również wartość zmienną /zmiennie natężenie/. Wartość prądu będzie się zmieniała jedynie w zależności od zmian wartości siły elektromotorycznej, bo opór, występujący w obwodzie, będzie miał wartość stałą. A zatem, oznaczając przez J maksymalną wartość prądu w obwodzie, z prawa Ohma otrzymamy, że

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

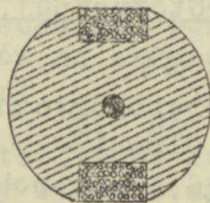
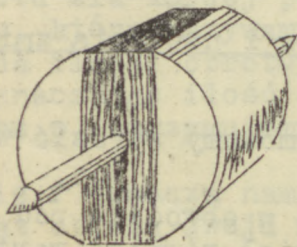
Odpowiednio wartość chwilowa prądu zmiennego

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R} \cdot \sin \omega t = I \sin \omega t.$$

Podobnie zmienia się napięcie. A więc

$$u = U \sin \omega t.$$

7. Budowa prądnicy prądu zmiennego. W poprzednich rozważaniach uważaliśmy tylko jeden zwój, który obracał się w polu magnetycznym wytworzonym przez jedną lub więcej par biegunów magnesów w prądnicach



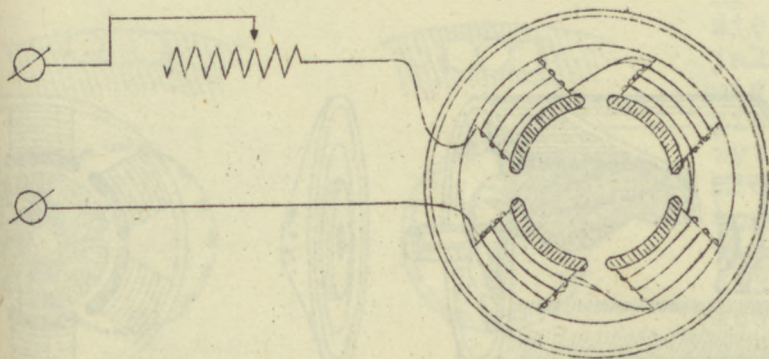
Rys.118. Najprostszy typ twornika i jego przekrój.

W rzeczywistości jednak zwojów tych jest znacznie więcej, gdybyśmy bowiem mieli tylko jeden zwój, zaindukowana siła elektromotoryczna byłaby za mała, abyśmy ją mogli praktycznie wykorzystać. Zwykle w prądnicach jest na walec żelazny o specjalnym kształcie/rys. 118. celem możliwego zwiększenia gęstości strumienia magnetycznego, przechodzącego przez zwoje. Ten walec żelazny zaopatrzony jest w wał, który, osadzony na panewkach w obrotach prądnicy, może być obracany bądź to przy pomocy korby ręcznej bądź też napędem mechanicznym. Walec ten wraz z uzwojeniami nazywa się twornikiem prądnicy. W małych prądnicach pole magnetyczne otrzymujemy dzięki umieszczeniu w nich magnesów stałych/jak np. w magnetach

amochodowych i induktorach telefonicznych/. Tam, gdzie chodzi o uzyskanie dużych sił elektromotorycznych, używamy nie magnesów, a elektromagnesów, przez których uzwojenia przepływa prąd stały, magnesując rdzenie /rys.119 /.

Rdzenie te są zaopatrzone w nabiegunki o tak wytoczonym kształ-

cie, aby szczelina powietrzna pomiędzy magnesami a obracającym się twornikiem była jak najmniejsza, chodzi tu bowiem o możliwe zredukowanie oporu magnetycznego ośrodka. Regulację natężenia pola magnetycznego w tego rodzaju prądnicach uzyskujemy przez



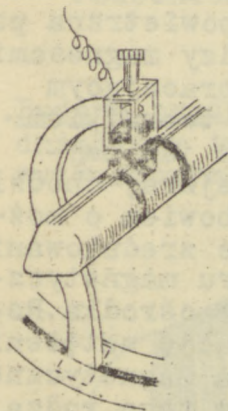
Rys.119. Magneśnica.

łączenie w obwód uzwojeń elektromagnesów odpowiednio dobranego reostatnika regulowanego.

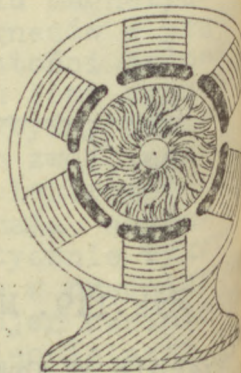
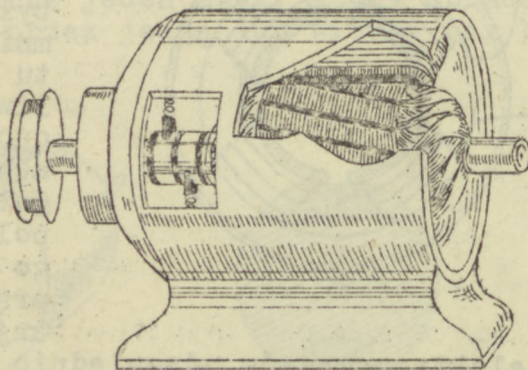
Zespół elektromagnesów wraz z uzwojeniami nazywamy magneśnicą. Zasilacem magneśnicę możemy z jakiegóś osobnej baterii akumulatorów, lub innego źródła siły elektromotorycznej stałej.

Aby na zaciskach prądnic otrzymać napięcie, należy je połączyć w jakiś sposób z obydwojma końcami uzwojeń twornika. Ponieważ twornik się obraca, połączenie to zostałoby przerwane, gdyby było wykonane z drutu, łączącego zaciski prądnic i oba końce uzwojeń twornika na stałe. Dlatego też na osi twornika umieszczone są na podkładce

izolacyjnej dwa pierścienie, które się obracają wraz z twornikiem. Do pierścieni tych przylegają tzw. szczotki, wykonane albo z miedzi albo z węgla retortowego, albo też z mieszaniny miedzi i węgla. Szczotki są już bezpośrednio połączone z zaciskami prądnicy /rys. 120



osada szczotek

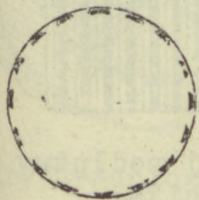
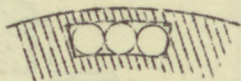
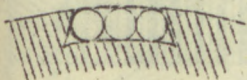


Rys.120. Podłużny i poprzeczny przekrój prądnicy.

Przy bardzo szybkich obrotach twornika powstałyby duże siły odśrodkowe, to też uzwojeń twornika nie można nawijać na walec bez zabezpieczenia się przed ewentualnym wyrwaniem ich z obsady przy szybkich obrotach. Takie wyrwanie uzwojeń z twornika pod wpływem jego zbyt szybkich obrotów nazywamy wybuchem lub eksplozją twornika.

powodu bardzo małej szczeliny powietrznej pomiędzy twornikiem a kolegunnikami twornik może się wtedy łatwo zatrzeć i unieruchomić. Aby uniknąć tego niebezpieczeństwa, poszczególne zwoje twornika umieszczamy w specjalnych żłobkach, aby je, jak mówimy, "zaklinować". Żłobki te mogą być albo otwarte /rys.121/, albo zamknięte /rys.122/.

Po pewnym czasie szczotki w prądniccy wycierają się, materiał bowiem, z jakiego są zrobione, jest miękki, aby nie rysował pierścieni. Pierścienie te wytoczone są zwykle z miedzi, aby opór ich był możliwie mały, chodzi bowiem o jaknajmniejszy spadek napięcia na obwodzie wewnętrznym i o zastosowanie materiału miękkiego, któryby łatwo dawał się wygładzić i nie rysował szczotek.

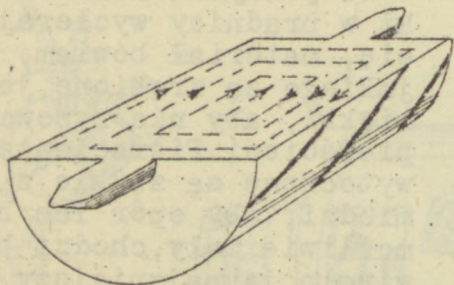


Rys.121. Żłobki otwarte na korpusie twornika.

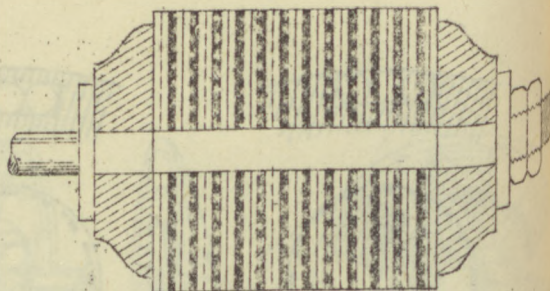
Rys.122. Żłobki zamknięte w korpusie twornika.

Prądy wirowe /Foucault/. Ponieważ twornik obraca się w polu magnetycznym, a korpus jego zrobiony jest z żelaza, indukuje się w nim również siła elektromotoryczna, pod której wpływem płyną w żelazie prądy, zwane prądami wirowymi lub prądami Foucault /rys.123/. Na mocy reguły Lenza prądy te wywoływać będą powstanie pola magnetycznego o kierunku przeciwnym strumieniowi magnetycznemu magnesu, redukując go w ten sposób, a zatem zmniejszając siłę elektromotoryczną. Aby to niepożądane zjawisko usunąć, robi się korpusy

tworników z szeregu płytek żelaznych, oddzielonych od siebie mika-
papierem lub lakierem izolacyjnym. Nie wpływa to zupełnie na prze-
kalność magnetyczną korpusu twornika, ponieważ strumień może w da-
szym ciągu przechodzić bez przeszkód wpoprzek jego korpusu/rys. 123



Rys.123. Prądy wirowe/Foucault/
w korpusie twornika.

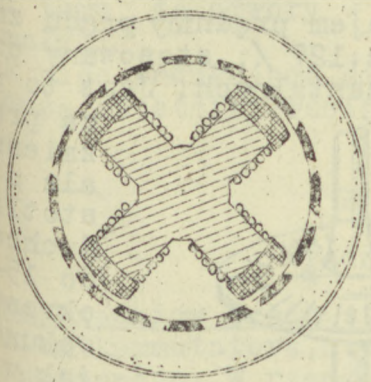


Rys.124. Przekrój podłużny korpu-
su twornika.

9. Prądnicę o obracającej się magneśnicy. Niezawsze prądnicę prądu zmi-
nego zbudowane są w wyżej opisany sposób. W niektórych prądnicach
bowiem twornik jest nieruchomy, a obraca się magneśnica /rys.125/
Sposób indukowania się siły elektromotorycznej jest jednak zupeł-
nie identyczny, jak w poprzednim typie prądnic.

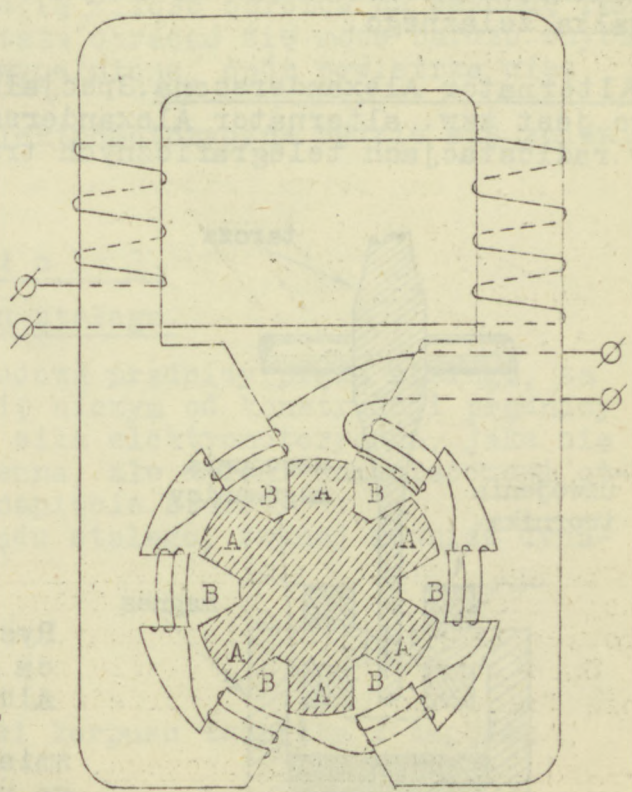
10. Prądnicę typu induktorowego. Tam, gdzie chodzi o otrzymanie dużych
częstotliwości, stosuje się prądnicę prądu zmiennego typu induktor-
owego, w których zarówno uzwojenie twornika, jak i magneśnicy nawi-
nięte są na nieruchomej obudowie czyli statorze, a obraca się tylk-
wałek żelazny, zaopatrzony w wycięcia /rys.126/.

Zmiana strumienia magnetycznego następuje w tej prądnicie wskutek zmiany wartości oporności magnetycznej ośrodka. Gdy zęby A pokrywają się z nabiegownikami magnesnicy, oporność ośrodka magnetycznego jest



Rys.125. Prądnicą o obracającej się magnesnicy.

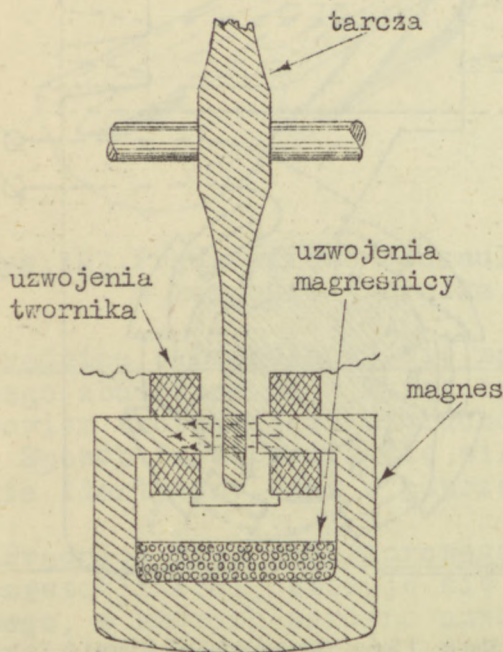
... wtedy mała, a więc gęstość strumienia magnetycznego jest duża. Gdy natomiast wycięcia B najdą na nabiegunki magnesnicy, oporność magnetyczna ośrodka wzrasta, dzięki czemu gęstość strumienia magnetycznego maleje. Zmiany strumienia magnetycznego wywołują z kolei w omówiony już sposób zaindukowanie się siły elektromotorycznej zmiennej



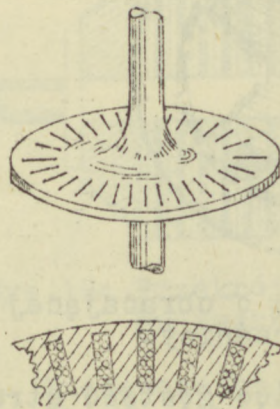
Rys.126. Prądnicą typu induktorowego.

w uzwojeniach twornika. Częstotliwość prądu zmiennego, płynącego w obwodzie pod jej wpływem, określa się iloczynem ilości obrotów na sekundę i ilości wcięć na korpusie rotora czyli obracającego się wałka żelaznego.

11. Alternator Alexanderssona. Specjalnym rodzajem prądnicy prądu zmiennego jest tzw. alternator Alexanderssona /rys.127 /, stosowany czasami w radiostacjach telegraficznych transkontynentalnych. Jest to prąd



Rys.127. Alternator Alexanderssona.



Rys.128. Tarcza, obracająca się w alternatorze Alexanderssona.

ca prądu zmiennego ale o częstotliwości dochodzącej do 15-20 okresów na sekundę jak w innych prądnicach, w których prąd zmienny, uzwojenia magnesnicy i twornika nawiązane są do statoru, zmienia gęstości strumienia magnetycznego uzyskujemy przez bardzo szybki obrót tarczy żelaznej, zaopatrzonej w szereg otworów, wypełnionych miedzią /rys.128/. Ponieważ miedź jest paramagnetyczna, opór ośrodka w momencie, gdy otwór,

wypełniony miedzią, najdzie na biegun magnesu, znacznie warasta. Tak więc otrzymujemy w tego typu prądniczy zmianę gęstości strumienia magnetycznego z dużą częstotliwością / ilość obrotów na sekundę razy ilość otworów w tarczy /. Tarcza taka obracać się może bardzo szybko dzięki temu, że otwory w niej są wypełnione, opór powietrza więc jest mały.

Tak więc indukująca się siła elektromotoryczna będzie się zmieniać z dużą częstotliwością.

R o z d z i a ł 3.

Prądnicą prądu stałego.

Budowa prądniczy prądu stałego. Budowa prądniczy prądu stałego, za wyjątkiem kommutatora, nie różni się niczym od konstrukcji prądniczy prądu zmiennego. W rzeczywistości siła elektromotoryczna, jaka się w niej wytwarza, jest również zmienna, ale dzięki kommutatorowi otrzymujemy w obwodzie zewnętrznym napięcie stałe.

Głównymi częściami prądniczy prądu stałego, zwanej również dynamo, są:

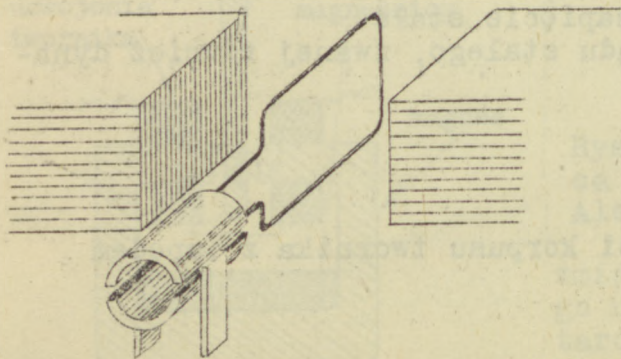
- magneśnica,
- uzwojenie twornika,
- korpus twornika,
- wał korpusu twornika,
- sprzęgło dla połączenia osi korpusu twornika z napędem mechanicznym,
- kommutator i
- szczotki.

Magnesy magneśnicy są przeważnie elektromagnesami, za wyjątkiem bardzo małych prądnic, ponieważ magnesy stałe mają następujące wady:

- ważą więcej, niż elektromagnesy, które mają dawać ten sam strumień magnetyczny,
- względnie łatwo się rozmagnesowują i
- bardzo trudno jest zmienić natężenie pola magnetycznego.

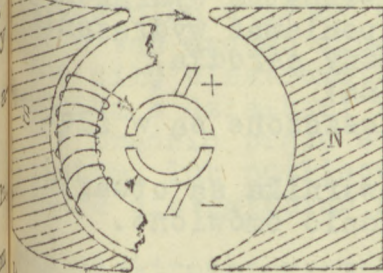
W małych prądnicach mamy tylko dwa bieguny, a w większych - a par biegunów. Prądnice pierwszego typu nazywamy dwubiegunowymi, a drugiego rodzaju - wielobiegunowymi. Korpus twornika skonstruowany jest z płytek celem zredukowania strat, wynikających z przepływu prądów wirowych. Uzwojenia na korpusie twornika prądnicy prądu stałego są osadzone w identyczny sposób, co i na korpusie twornika prądnicy prądu zmiennego.

W prądnicę prądu stałego zamiast do dwóch pierścieni ślizgowych końce uzwojeń dołączone są do dwóch połówek jednego pierścienia /rys.129 /. W uzwojeniach twornika indukuje się co prawda w dalszym ciągu siła elektromotoryczna zmienna, ale w obwodzie zewnętrznym będziemy mieli prąd tętniasty, ponieważ z odwróceniem się kierunku prądu w jednym z uzwojeń, przerywa się w nim połączenie, a na to miejsce przychodzi drugi półpierścień, z którego zbieramy znów ładunki tego samego znaku, mimo że przed chwilą kierunek siły elektromotorycznej był odwrotny. Zasadę działania komutatora dokładnie wyjaśnia rys. 130. Jak więc widzimy, w samych uzwojeniach w dalszym ciągu indukuje się siła elektromotoryczna

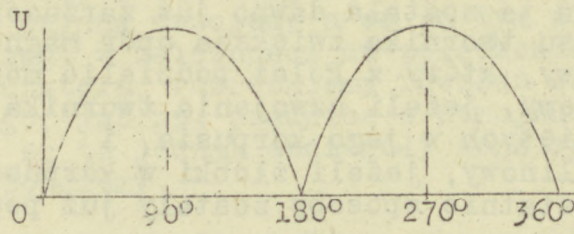


Rys.129. Półpierścień w prądnicę prądu stałego.

nienna, ale ze zmianą siły elektromotorycznej, indukującej się w uzwojeniach, zmienia się również i półpierzście, do którego te uzwojenia są przymocowane, a zatem i szczotka, zbierająca ładunki. Wynika z tego, że w obwodzie zewnętrznym dostaniemy na zaciskach prądnicy prądu

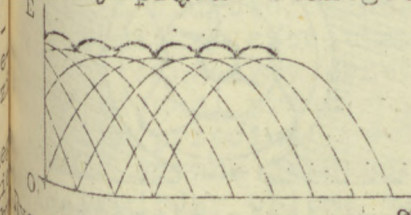


Rys. 130. Ilustracja zasady działania kommutatora w prądnicach prądu stałego.



Rys. 131. Wykres napięcia na zaciskach prądnicy prądu stałego.

cy prądu stałego napięcie, które można przedstawić wykresem, jak na rys. 131. Ten przecięty pierścień nazywamy kommutatorem. Dzięki na-



Rys. 132. Wykres siły elektromotorycznej stałej, powstającej w prądnicach prądu stałego.

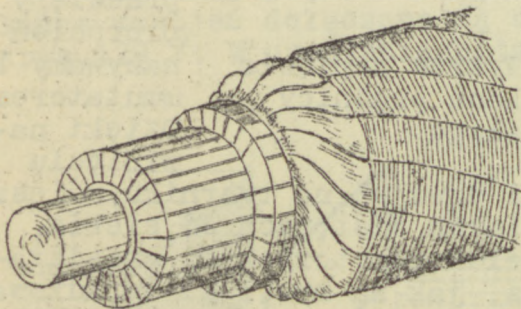
winie pewnej ilości uzwojeń na tworniku, umieszczonych w różnych odstępach od siebie, wykres siły elektromotorycznej przedstawia się teraz, jak na rys. 132. Wypadkowa siła elektromotoryczna, która powstanie jako suma sił elektromotorycznych, indukujących się w poszczególnych uzwojeniach, wykreślona jest na tym rysunku grubą linią ciągłą.

Konstrukcja twornika. Konstrukcja twornika i umieszczonego na niej kommutatora pokazana jest na rys. 133. Kommutator składa się z pewnej ilości segmentów czyli działek z twardej miedzi. Segmenty te

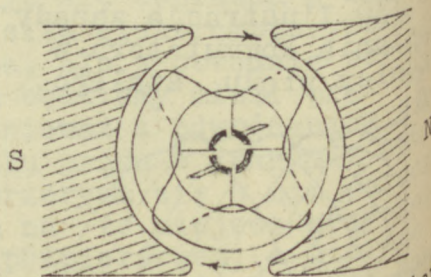
odizolowane są od siebie i od osi twornika i są umieszczone w równych odstępach.

Istnieje cały szereg sposobów nawijania tworników prądnic prądu stałego:

- pierścieniowy /starego typu - rys.134 /, w którym uzwojenia twornika przechodzą przez jego korpus, wewnątrz wydrążony. Metoda ta została dawno już zarzucona, ponieważ wydrążenie korpusu twornika zwiększa opór magnetyczny osrodka,
- bębnowy, który z kolei podzielić można na:
- kanałowy, jeżeli uzwojenia twornika umieszczone są w żłobkach zamkniętych w jego korpusie, i
- szczelinowy, jeżeli żłobki w korpusie twornika są otwarte. dwa ostatnie sposoby zostały już poprzednio omówione.



Rys.133. Twornik prądnic prądu stałego wraz z osadzonym nań kommutatorem.



Rys.134. Nawinięcie pierścieniowe twornika prądnic prądu stałego

W zależności od sposobu połączenia ze sobą poszczególnych zwojów rozmaite systemy nawinięcia twornika opatrzone są różnymi nazwami. W zasadzie poszczególne uzwojenia łączy się ze sobą szeregowo, a po kilka uzwojeń łączymy ze sobą równoległe tylko wtedy, gdy przez

uzwojenia twornika, a więc i w obwodzie zewnętrznym, płyną prądy o dużym natężeniu. To równoległe połączenie robi się celem zwiększenia przekroju uzwojeń twornika, aby się pod wpływem przepływającego prądu zbyt nie nagrzewały. W zasadzie jednak jaknajwięcej uzwojeń twornika staramy się połączyć ze sobą szeregowo, zwiększamy bowiem w ten sposób długość czynną uzwojeń, a co za tym idzie, wytwarzaną siłę elektromotoryczną. W zależności od połączenia uzwojeń twornika z działkami kommutatora, rozróżniamy również cały szereg typów prądnic prądu stałego, jak np. prądnice o uzwojeniu twornika falistym, lub pętlicowym, są to jednak szczegóły konstrukcyjne, które się wglębiać nie będziemy.

Siła elektromotoryczna prądnicy prądu stałego. Chcąc obliczyć siłę elektromotoryczną, jaka zostaje przez daną prądnicę wytworzona, musimy znać ilość par biegunów magnetycznych tej prądnicy, wielkość strumienia magnetycznego, przypadającego na jeden biegun, szybkość obrotu i długość czynną uzwojeń lub ilość zwojów, połączonych ze sobą pomiędzy szczotkami szeregowo. Jeżeli ilość par biegunów magnetycznych oznaczymy przez p , a strumień magnetyczny, przypadający na każdy biegun, przez ϕ , to podczas jednego obrotu każde uzwojenie twornika przecina $p\phi$ linii sił pola magnetycznego. Jeżeli teraz długość czynną przewodnika, a więc ilość zwojów, połączonych szeregowo pomiędzy obiema szczotkami, oznaczymy przez n , a ilość obrotów na sekundę przez N , to wiedząc, że wielkość indukującej się siły elektromotorycznej zależy od szybkości zmian strumienia zwojów, otrzymamy:

$$E = pnN\phi.$$

Ponieważ ϕ zwykle podajemy w jednostkach elektromagnetycznych, a więc teoretycznych, a siłę elektromotoryczną zazwyczaj obliczamy w woltach, to też uwzględnimy w tym wzorze współczynnik

proporcjonalności, otrzymując:

$$E = pnN\phi \cdot 10^{-8} \text{ woltów.}$$

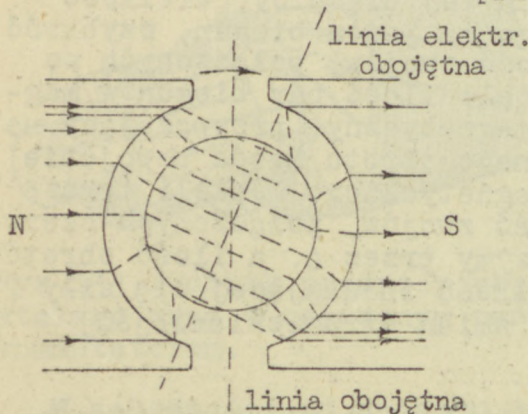
We wzorze tym p, n i 10^{-8} są wartościami stałymi, zmienna jest tylko ilość obrotów na sekundę $/N/$ i zmienny jest również strumień magnetyczny $/\phi/$. Dla badania zmiany wartości siły elektromotorycznej w zależności od zmian czy to strumienia magnetycznego, czy to szybkości obrotów twornika, równanie powyższe napisać możemy w skróconej formie:

$$E = k.N\phi,$$

gdzie k oznacza stałą iloczyn

$$p.n.10^{-8}.$$

4. Reakcja twornika. Gdy obwód prądnicy prądu stałego jest zamknięty, przez uzwojenia twornika przepływa prąd,



który wytwarza pole magnetyczne, przeciwdziałające, zgodnie z regułą Lenza, polu magnetycznemu, powstałemu dzięki magnesnicy. Zjawisko to nazywa się reakcją twornika.

Reakcja twornika polega zatem na powstawaniu dodatkowego pola magnetycznego o kierunku przeciwnym polu magnetycznemu magnesnicy. Przeciwdziałanie tego pola magnetycznego polega na:

- zniekształceniu kierunku strumienia magnetycznego magnesnicy /rys. 135/ i
- rozmagnesowywaniu biegunów

Rys. 135. Ilustracja reakcji twornika w prądnicy.

magneśnicy, a zatem zmniejszaniu strumienia magnetycznego ϕ /.

Wielkość tych dwóch składowych strumieni nowopowstałego pola magnetycznego zależy od wzajemnego położenia szczotek na kommutatorze. Jak widzimy z rys. 135, linia obojętna jest nieco odchylona od linii elektrycznej obojętnej, aby zatem kommutacja czyli zmiana kierunku indukującej się siły elektromotorycznej następowała w odpowiedniej chwili, szczotki trzeba przesunąć nieco w kierunku obrotu twornika. Przesunięcie szczotek pozwala nam na usunięcie skutków niepożądanego zjawiska reakcji twornika.

Iskrzenie i szczotki. Przy obracaniu się twornika każda ze szczotek wiera ze sobą na krótki czas dwie lub więcej działek kommutatora, a zatem i zwoje, z tymi działkami połączone. Wskutek tego siła przeciwelektromotoryczna, powstająca w tych zwojach, mając w momencie przerwania styku wartość największą, przejawia się w ten sposób, w miarę obracania się całego twornika wraz z kommutatorem, pomiędzy segmentami kommutatora a szczotkami występuje iskrzenie. To niepożądane iskrzenie usunąć możemy:

- przy pomocy szczotek węglowych, które mają duży opór i dlatego zmniejszają iskrzenie,
- przez przesunięcie szczotek z położenia na linii geometrycznej obojętnej nieco poza linię elektryczną obojętną. Do tego celu niekoniecznie musimy użyć jednej ze szczotek kolektora / tj. zespołu kommutator - szczotki, służące do zbierania ładunków z kommutatora /, a możemy umieścić w prądnicę trzecią, zazwyczaj mniejszą szczotkę. Szczotka ta umieszczona jest tak, aby siła elektromotoryczna, powstająca w zwojach, tą szczotką zwieranych, i zgodna z kierunkiem prądu po kommutacji, przeciwdziałała całkowicie sile przeciwelektromotorycznej samoindukcji w uzwojeniach twornika,
- przy pomocy biegunów dodatkowych, które niekoniecznie muszą być ruchome; uzwojenia elektromagnesów nawinięte są na nie

w takim kierunku i w takiej ilości, aby pole magnetyczne, które dzięki przepływającemu przez nie prądowi powstaje, neutralizowało narastanie siły przeciwelektromotorycznej.

Z zastosowania szczotek węglowych w prądnicach mamy pewne korzyści a mianowicie:

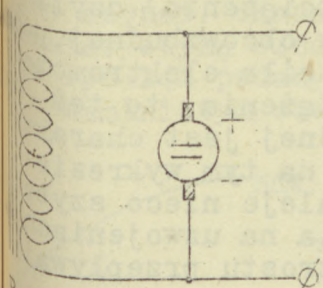
- Gdy mimo wszystko iskrzenie zachodzi, to jednak kommutator zostaje mniej uszkodzony, niż w wypadku użycia szczotek miedzianych, a uszkodzenie samych szczotek jest znacznie mniej kłopotliwe,
- szczotki węglowe są dosyć miękkie i nie rysują kommutatora a raczej wygładzają jego powierzchnię.

Szczotki węglowe mają jednak szereg wad. Po pierwsze duży ich opór powoduje stratę około 2 woltów przy spadku napięcia na oporze wewnętrznym, nie można ich zatem używać do niskonapięciowych prądnic; poza tym zbyt szybko się wycierają i nie nadają się do prądnic szybkoobrotowych.

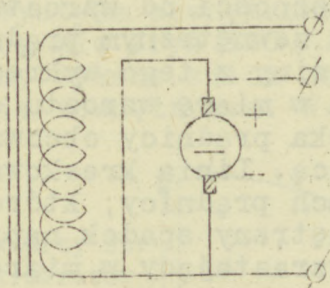
6. Rodzaje prądnic prądu stałego. Mówiliśmy już o tym, że prądnice mogą być zaopatrzone albo w magnesy stałe, albo w magneśnicę, zasilaną z osobnego źródła, lub w prądnicach prądu stałego - z samej prądnicy. Jeżeli uzwojenia magneśnicy zasilamy z obcego źródła, to prądnice takie nazywamy obcowzbudnymi, jeżeli zaś magneśnica jest zasilana przez tę samą prądnicę, to prądnicę taką nazywamy samowzbudną. W zależności od sposobu zasilania magneśnicy w prądnicach samowzbudnych, rozróżniamy prądnice bocznikowe, szeregowo i szeregowo-bocznikowe.

Jeżeli uzwojenia magneśnicy są założone równolegle do obwodu zewnętrznego /rys.136/, to prądnicę taką nazywamy bocznikową. W wypadku, gdy uzwojenia magneśnicy są połączone w szereg z obwodem zewnętrznym /rys.137/, prądnicę taką nazywamy szeregową. Istnieją poza tym prądnice, których magneśnice mają uzwojenia częściowo połączone do obwodu zewnętrznego szeregowo, a częściowo równolegle. Takie

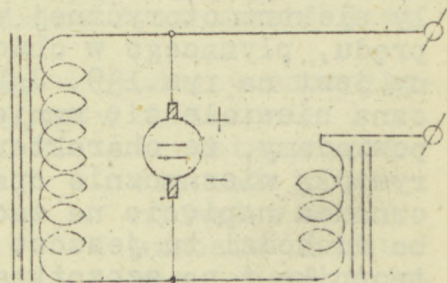
Prądnicę nazywamy prądnicami szeregowo-bocznikowymi /rys.138 /.



Rys.136. Schemat prądnicy bocznikowej.



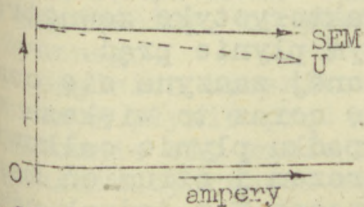
Rys.137. Schemat prądnicy szeregowej.



Rys.138. Schemat prądnicy szeregowo-bocznikowej.

Charakterystyka prądnicy obcowzbudnej. Najbardziej interesujące jest dla nas zagadnienie, jak zmienia się siła elektromotoryczna prądnicy w zależności od obciążenia, czyli w zależności od natężenia przepływającego prądu.

W prądnicach obcowzbudnej przy stałej wysokości obrotów



Rys.139. Charakterystyka prądnicy obcowzbudnej.

siła elektromotoryczna jest prawie niezależna od obciążenia; w miarę wzrostu natężenia prądu, przepływającego w obwodzie zewnętrznym, siła elektromotoryczna prądnicy zmniejsza się tylko nieznacznie, bo, w miarę wzrostu prądu, przepływającego przez przewód zewnętrzny, a więc i przez uzwojenie twornika, zwiększa się strumień magnetyczny, przeciwdziałający strumieniowi magnetycznemu magnesu. W rezultacie strumień magnetyczny Φ zmniejsza się, a zatem i siła

elektromotoryczna $E = k\phi N$ również się zmniejsza. Wykres zmiany siły elektromotorycznej w zależności od wzrostu obciążenia, czyli prądu, płynącego w obwodzie zewnętrznym prądnicy obcowzbudnej, podany jest na rys. 139. Jak widzimy z tego wykresu, siła elektromotoryczna niewiele się zmniejsza w miarę wzrostu obciążenia, to też powiadamy, że charakterystyka prądnicy obcowzbudnej jest charakterystyką nieznacznie opadającą. Linia kreskowana na tym wykresie oznacza napięcie na zaciskach prądnicy, które maleje nieco szybciej, bo dochodzi tu jeszcze wewnętrzny spadek napięcia na uzwojeniach twornika i na szczotkach, wzrastający w miarę wzrostu przepływającego prądu.

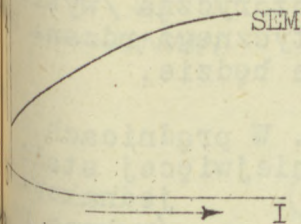
8. Charakterystyka prądnicy bocznikowej. W samowzbudnej prądnicy bocznikowej proces zmiany wartości siły elektromotorycznej musimy podzielić na dwa wypadki; zmiana bowiem wartości siły elektromotorycznej w wypadku, gdy prądnica jest obciążona, tzn., gdy obwód zewnętrzny jest zamknięty i gdy płynie w nim prąd, przebiega inaczej, niż przy biegu luzem czyli biegu jałowym, tzn., gdy obwód zewnętrzny jest otwarty i żaden prąd w nim nie płynie.

Rozróżniamy wobec tego charakterystykę wewnętrzną prądnicy bocznikowej i charakterystykę zewnętrzną. Charakterystykę wewnętrzną podajemy dla prądnicy nieobciążonej, a charakterystykę zewnętrzną - dla prądnicy, w której obwodzie zewnętrznym płynie prąd.

W miarę gdy twornik w prądnicy nieobciążonej zaczyna się coraz szybciej obracać, w uzwojeniach indukuje się coraz to większa siła elektromotoryczna. Ponieważ prąd w takim wypadku płynie całkowicie przez uzwojenia magnesnicy, zwiększa się zarazem i strumień magnetyczny, a zatem i siła elektromotoryczna. Proces ten jednak nie będzie się ciągnął w nieskończoność, ponieważ wzrost strumienia magnetycznego ograniczony jest magnetycznym nasyceniem się rdzeni

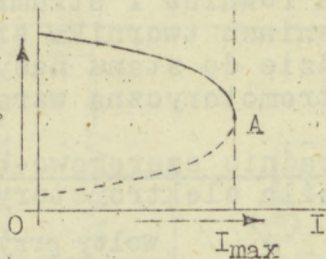
magnesnicy. Siła elektromotoryczna zatem wzrośnie jedynie do wartości, ograniczonej stanem nasycenia. W każdym razie, w początkowej części, charakterystyka wewnętrzna prądnicy bocznikowej jest charakterystyką wznoszącą się /rys.140 /.

Na rys.141 podany mamy wykres zmian napięcia w prądnicy bocznikowej o zamkniętym obwodzie zewnętrznym. W miarę, gdy obciążenie



wolty przy st. szybk.obrotów

rys.140.Charakterystyka wewnętrzna samowzbudnej prądnicy bocznikowej.



Rys.141.Charakterystyka zewnętrzna samowzbudnej prądnicy bocznikowej.

wzrasta, napięcie maleje, ponieważ w miarę wzrostu natężenia przepływającego prądu wzrasta zarazem i spadek napięcia na oporze wewnętrznym prądnicy. Spadek wartości napięcia w prądnicy bocznikowej

schodzi jednak szybciej, niż spadek wartości napięcia w prądnicy samowzbudnej, ponieważ prócz spadku na oporze wewnętrznym mamy tu jeszcze zmniejszanie się natężenia przepływającego prądu przez uzwojenie magnesnicy, co pociąga za sobą zmniejszanie się strumienia magnetycznego.

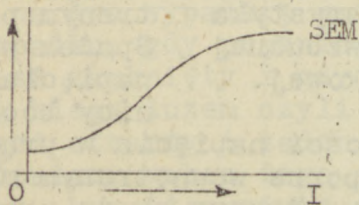
Gdy prądnica bocznikowa zostaje przeciążona, tzn., gdy w obwodzie zewnętrznym płynie prąd o zbyt dużym natężeniu, siła elektromotoryczna gwałtownie się zmniejsza /pkt.A na krzywej/, a przy dalszym zmniejszaniu oporności zewnętrznej opada do wartości, ograniczonej natężeniem szczątkowym magnesnicy. Dzieje się to dlatego, że prawie całkowity prąd przepływa wtedy przez obwód zewnętrzny, a prawie cały - przez uzwojenie magnesnicy. Dlatego też strumień magnetyczny opada prawie do zera, a zatem i iloczyn $k\phi N = E$ również spada

prawie do zera, a prąd stopniowo zanika.

9. Charakterystyka prądnic szeregowej. W prądnicach szeregowych nie mówimy o charakterystyce wewnętrznej, ponieważ przez uzwojenie magnetyczne prąd płynie tylko wtedy, gdy obwód zewnętrzny jest zamknięty. W miarę zwiększania się zatem prądu, przepływającego przez obwód zewnętrzny, wzrasta również i strumień magnetyczny, a zatem i indukująca się w uzwojeniach twornika siła elektromotoryczna /wykres rys.142 /. Gdy dojdzie do stanu nasycenia magnetycznego rdzenia magnetycznego, siła elektromotoryczna wzrastać już nie będzie.

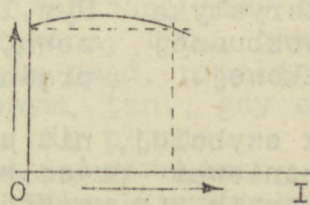
10. Charakterystyka prądnic szeregowo-bocznikowych. W prądnicach szeregowo-bocznikowych siła elektromotoryczna jest mniej więcej stale

wolty przy stałej
szybkości obrotów



Rys.142. Charakterystyka samowzbudnej prądnicy szeregowej.

wolty przy stałej
szybkości obrotów

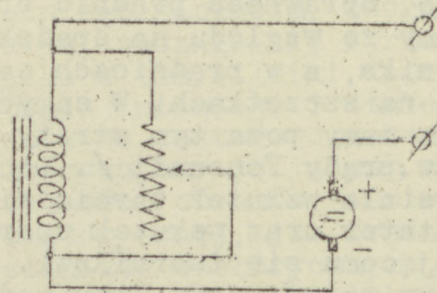
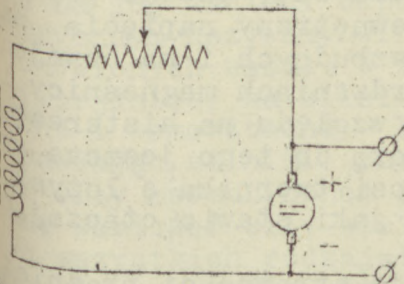


Rys.143. Charakterystyka zewnętrzna samowzbudnej prądnicy szeregowo-bocznikowej.

maleje, a zatem, niezależnie od obciążenia, w takiej prądnicach szeregowo-bocznikowych siła elektromotoryczna utrzymuje się na jednym poziomie.

jednakowa /wykres na rys.143/. Gdy prąd, płynący przez szeregowo-bocznikowe uzwojenie magnetyczne, zwiększa się to zarazem prąd płynący przez bocznikowe uzwojenie magnetyczne.

Regulacja SEM w prądnicach prądu stałego. Siłę elektromotoryczną prądnicy o danym obciążeniu zmieniać możemy albo przez zmianę szybkości obrotów, co robi się tylko w wyjątkowych wypadkach, albo przez zmianę strumienia magnetycznego. Strumień magnetyczny łatwo się zmienia



Rys. 144. Regulacja napięcia w prądnicach bocznikowej.

Rys. 145. Regulacja napięcia w prądnicach szeregowych.

prąży pomocy oporników regulowanych, zmieniając w ten sposób prąd wzbudzenia.

W prądnicach bocznikowych zmniejszenie oporu wywołuje wzrost strumienia magnetycznego, a zatem i indukującej się w twor-

zacji siły elektromotorycznej /rys. 144 /.

W prądnicach szeregowych opornik regulowany włączony jest równolegle do uzwojeń magnesnicy /rys. 145 /.

Dla zwiększenia strumienia magnetycznego musimy zwiększyć również i natężenie prądu, przepływającego przez uzwojenia magnesnicy. W tym celu opór, włączony równolegle do jej uzwojeń, musi być zwiększony.

Praktyczne zastosowanie poszczególnych rodzajów prądnic. Prądnice indukcyjne i prądnice bocznikowe używane są powszechnie dla zasilania sieci siły i światła. Prądnice szeregowo-bocznikowe używane są w urządzeniach trakcyjnych, ponieważ siła elektromotoryczna prąży

danym obciążeniu prawie nie zależy w tych prądnicach /w pewnych granicach / od szybkości obrotów twornika. Prądnic szeregowych używa się do zasilania lamp łukowych, reflektorów i aparatur kinematograficznych.

13. Sprawność prądnic. Sprawność prądnic oblicza się, biorąc pod uwagę straty, jakie mamy ze względu na spadek wewnętrzny napięcia na uzwojeniach twornika, a w prądnicach samowzbudnych i na uzwojeniu magnesnicy, oraz na szczotkach. W samych rdzeniach magnesnicy i w korpusie twornika mamy poza tym straty ze względu na histerezę i prądy wirowe /tzw. prądy Foucault /. Dochodzą do tego jeszcze straty mechaniczne, powstałe wskutek tarcia się osi twornika o łożysko, szczotek o kommutator oraz wskutek oporu, jaki stawia otaczające powietrze obracającemu się twornikowi.

W związku z tym rozróżniamy trzy rodzaje sprawności prądnic: mechaniczną, elektryczną i przemysłową.

Sprawność mechaniczna / η_m / jest to stosunek wytworzonej całkowitej mocy elektrycznej do mocy mechanicznej napędu.

Sprawność elektryczna / η_e / jest to stosunek mocy elektrycznej w obwodzie zewnętrznym do całkowitej wytworzonej mocy elektrycznej.

Przy obliczaniu sprawności przemysłowej / η_p / uwzględnia się wszystkie straty, jest to bowiem stosunek mocy elektrycznej w obwodzie zewnętrznym do mocy mechanicznej napędu.

Wynika z tego, że

$$\eta_p = \eta_m \times \eta_e .$$

R o z d z i a ł 4.

Silniki i przetwornice.

ogólne zasady działania silników elektrycznych. Każda prądnicą prądu stałego użyta być może jako silnik elektryczny, ponieważ, po przyłożeniu na jej zaciski odpowiedniego napięcia, twornik, który w silniku elektrycznym nazywamy wirnikiem, zacznie się obracać w myśl poprzednio omówionych zasad. W związku z tym silniki dzielimy identycznie, jak i prądnice, na silniki prądu zmiennego i stałego, silniki obwodowe i samowzbudne - bocznikowe, szeregowe i szeregowo-bocznikowe. Omawiając silniki, charakteryzujemy je jednak z punktu widzenia mechanicznej i szybkości obrotów, a nie ze względu na wartość siły elektromotorycznej, jak prądnice.

Wę wszystkie rodzaje silników elektrycznych im większy jest prąd, płynący przez uzwojenia twornika, tym większa jest siła mechaniczna. To samo tyczy się gęstości strumienia magnetycznego, zgodnie z znanym nam już wzorem:

$$F = \frac{BIl}{l_0}$$

Gdy wirnik się obraca, indukuje się w jego uzwojeniach, zgodnie z regułą Lenza, siła przeciwelektromotoryczna. Z prawa Ohma, oznaczając prąd, płynący przez wirnik, przez I_w , napięcie przyłożone - przez U , siłę przeciwelektromotoryczną - przez E , a opór twornika - przez R_w , wyznaczyć możemy natężenie prądu, przepływającego przez wirnik:

$$I_w = \frac{U - E}{R_w}$$

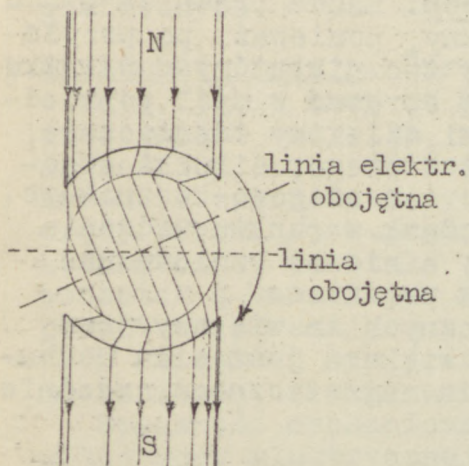
Stąd napięcie przyłożone

$$U = E + I_w R_w,$$

siła przeciwelektromotoryczna

$$E = U - I_w R_w.$$

Jak wiemy, wielkość tej siły przeciwelektromotorycznej zależy m.inn. od $N / b_0 E = k\phi N /$, a więc od szybkości obrotów wirnika. Wynika z tego, że szybkość obrotów wirnika w silniku musi się ustalić tak, aby powstała w nim siła przeciwelektromotoryczna równała się



Rys.146.Reakcja wirnika w silniku elektrycznym.

wirnika wywołuje odchylenie się linii elektrycznej obojętnej w kierunku przeciwnym do kierunku jego obrotu /rys.146/. Dlatego też, o ile nie zastosowane zostały bieguny dodatkowe lub uzwojenia dodatkowe, szczotki w silniku muszą być przesunięte nieco w kierunku przeciwnym do kierunku obrotu wirnika, aby zneutralizowany został szkodliwy wpływ reakcji wirnika.

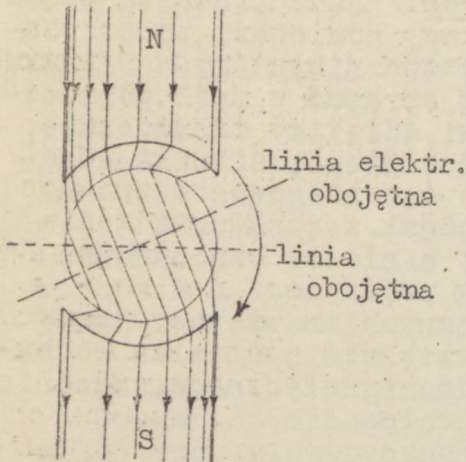
2. Charakterystyka i praktyczne zastosowanie silników różnych typów.

Charakterystyki silników różnego typu, podawane na wykresach, nazywają się krzywymi charakterystyki mechanicznej silników. Wykreśla

różnicy napięcia przyłożonego do zacisków silnika i spadku napięcia na jego oporze wewnętrznym. A zatem szybkość obrotów wirnika zależy od wartości siły przeciwelektromotorycznej, a siła mechaniczna - od natężenia prądu, przepływającego przez wirnik. Wynika z tego duża zaleta silników elektrycznych, a mianowicie automatyczne ustalanie się wchodzących w grę wielkości na takim poziomie, aby w granicach swojej mocy silnik elektryczny poddał każdemu obciążeniu. Nie dotyczy to oczywiście wypadków, kiedy silnik elektryczny zostaje przeciążony.

Ponieważ prąd w silniku płynie w kierunku przeciwnym do kierunku indukującej się siły elektromotorycznej, a nie w kierunku zgodnym z nią, jak w każdej prądnicie, reakcja

Jak wiemy, wielkość tej siły przeciwelektromotorycznej zależy m.inn. od $N / bo E = k\phi N /$, a więc od szybkości obrotów wirnika. Wynika z tego, że szybkość obrotów wirnika w silniku musi się ustalić tak, aby powstała w nim siła przeciwelektromotoryczna równała się



Rys.146.Reakcja wirnika w silniku elektrycznym.

wirnika wywołuje odchylenie się linii elektrycznej obojętnej w kierunku przeciwnym do kierunku jego obrotu /rys.146/. Dlatego też, o ile nie zastosowane zostały bieguny dodatkowe lub uzwojenia dodatkowe, szczotki w silniku muszą być przesunięte nieco w kierunku przeciwnym do kierunku obrotu wirnika, aby zneutralizowany został szkodliwy wpływ reakcji wirnika.

2. Charakterystyka i praktyczne zastosowanie silników różnych typów.

Charakterystyki silników różnego typu, podawane na wykresach, nazywają się krzywymi charakterystyki mechanicznej silników. Wykreśla

różnicy napięcia przyłożonego do zacisków silnika i spadku napięcia na jego oporze wewnętrznym. A zatem szybkość obrotów wirnika zależy od wartości siły przeciwelektromotorycznej, a siła mechaniczna - od natężenia prądu, przepływającego przez wirnik. Wynika z tego duża zaleta silników elektrycznych, a mianowicie automatyczne ustalanie się wchodzących w grę wielkości na takim poziomie, aby w granicach swojej mocy silnik elektryczny podobał każdemu obciążeniu. Nie dotyczy to oczywiście wypadków, kiedy silnik elektryczny zostaje przeciążony.

Ponieważ prąd w silniku płynie w kierunku przeciwnym do kierunku indukującej się siły elektromotorycznej, a nie w kierunku zgodnym z nią, jak w każdej prądniccy, reakcja

się je dla stałego napięcia przyłożonego i bada się zmianę szybkości obrotów w zależności od obciążenia.

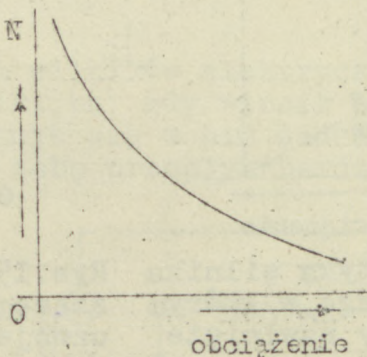
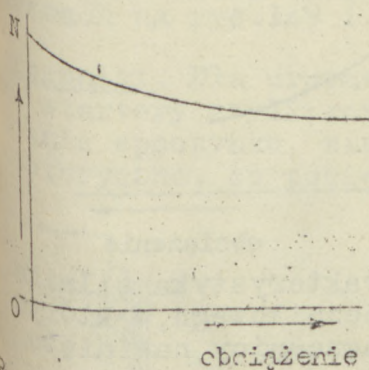
Na rys.147 podany jest wykres zmiany szybkości obrotów w silniku bocznikowym. W silniku takim prąd, płynący przez uzwojenia magnetyczne, ma stałe natężenie, ponieważ napięcie przyłożone jest stałe. Wzrost mechanicznego przypisać należy zmniejszaniu się siły przeciwoelektromagnetycznej. W miarę wzrostu obciążenia wzrasta również i reakcja

wirnika, co osłabia pole magnetyczne, powstające dzięki magnetycy; redukuje to nieco spadek szybkości obrotów wirnika.

Z powyższych względów silniki bocznikowe nadają się do napędu urządzeń i maszyn, wymagających względnie stałej szybkości obrotów.

szybkość obrotów przy stałym napięciu na zaciskach

szybkość obrotów przy stałym napięciu na zaciskach



Rys.147. Charakterystyka silnika bocznikowego.

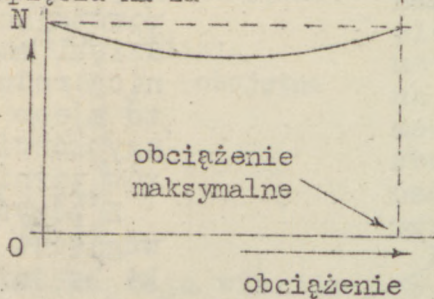
Rys.148. Charakterystyka silnika szeregowego.

Zupełnie podobnie przebiega wykres krzywej charakterystyki silników o stałych magnesach. Stałe magnesy nadają się jedynie do małych silników; przeważnie spotyka się je w rozmaitych rodzajach zabawek.

Na rys.148 mamy podaną charakterystykę silnika szeregowego. Gdy obciążenie wzrasta, wymaga to wzrostu natężenia prądu, płynącego przez uzwojenia wirnika, a zatem jednocześnie i wzrostu natężenia prądu, płynącego przez uzwojenia magnesnicy. Wywołuje to wzrost natężenia pola magnetycznego, powstałego dzięki magnesnicy, a co za tym idzie, i zmniejszenie się szybkości obrotów wirnika.

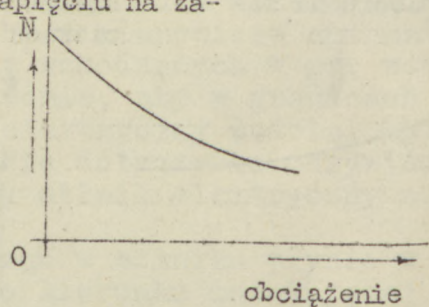
Z początku natężenie pola magnetycznego magnesnicy wzrasta prawie proporcjonalnie do wzrostu natężenia przepływającego prądu i

szybkość obrotów przy
stałym napięciu na za-
ciskach



Rys.149.Charakterystyka silnika szeregowo-bocznikowego, w którym uzwojenia magnesnicy nawinięte są różnicowo.

szybkość obrotów przy
stałym napięciu na za-
ciskach



Rys.150.Charakterystyka silnika szeregowo-bocznikowego, w którym uzwojenia magnesnicy nawinięte są zgodnie.

dlatego zmniejszanie się szybkości obrotów wraz z wzrostem obciążenia jest dość szybkie. Przy większych prądach natężenie pola magnetycznego wzrasta jednak znacznie wolniej, bo jednocześnie zmniejsza się znacznie przenikalność magnetyczna rdzeni magnesnicy. Co za tym idzie, szybkość obrotów spada również znacznie wolniej.

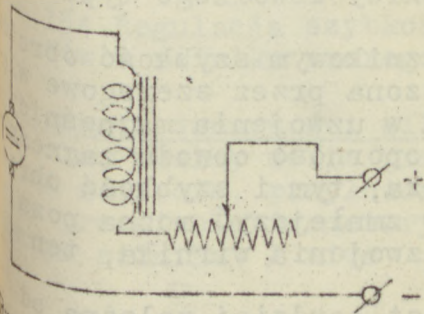
Silników szeregowych używa się przeważnie dla celów trakcyjnych, a więc np. w tramwajach i kolejkach elektrycznych, bo, jak widać wylresu na rys.148, mają one największy zryw przy wolnych obrotach, co ułatwia znacznie ich rozruch. W miarę zmniejszania się obciążenia, szybkość obrotów wirnika w silniku szeregowym znacznie rośnie, dlatego też nie należy uruchamiać silnika szeregowego bez obciążenia, bo grozi wtedy rozbieganie wię wirnika, a nawet i jego eksplozja.

Silniki szeregowo-bocznikowe mogą mieć uzwojenia magneśnicy nawinięte albo różnicowo /tzn., że uzwojenia szeregowo nawinięte są w kierunku przeciwnym do kierunku uzwojeń równoległych /, albo też zgodnie. W zależności od sposobu nawinięcia rozróżniamy zatem dwie typowe charakterystyki mechanicznej silnika; obydwie podane są na wylresach na rys.149 i 150.

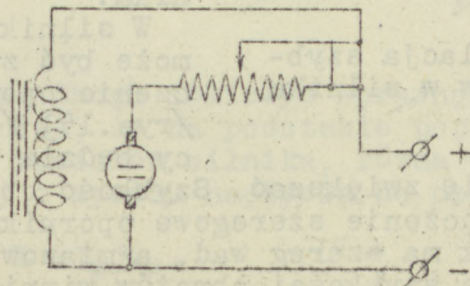
Rozruszniki. Dla uruchomienia silników elektrycznych konieczne są tzw. startery czyli rozruszniki, bo, gdy wirnik silnika znajduje się w stanie spoczynku, nie indukuje się w nim żadna siła przeciwelektromotoryczna, co pociąga za sobą przepływ bardzo dużego prądu przez

uzwojenia wirnika i magneśnicy, któreby się mogły w takim wypadku stopić.

Dlatego też w silniku szeregowym włącza się szeregowo



Rys.151. Rozrusznik silniku szeregowym.

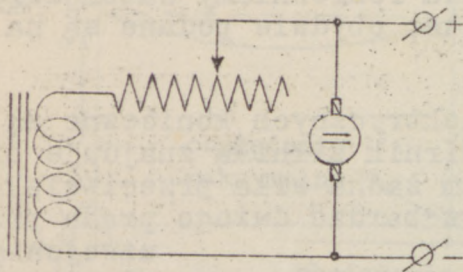


Rys.152. Rozrusznik w silniku bocznikowym.

do uzwojeń magneśnicy i twornika zmienny opornik, którego opór stopniowo zmniejszamy, w miarę zwiększania się szybkości obrotów wirnika /rys.151/.

W silniku bocznikowym umieszcza się opornik regulowany tylko w obwodzie uzwojeń wirnika /rys.152 /.

4. Regulacja szybkości obrotów. Szybkość obrotów silników elektrycznych regulować można albo przez zmianę przyłożonego napięcia, co jest niewygodne, bo zwykle korzystamy z napięcia sieci, które jest stałe, albo przez zmianę obciążenia, co nam jednak nie rozwiązuje sprawy regulowania szybkości obrotów przy stałym obciążeniu, albo wreszcie przez zmianę natężenia pola magnetycznego magneśnicy.



Rys.153. Regulacja szybkości obrotów w silniku bocznikowym.

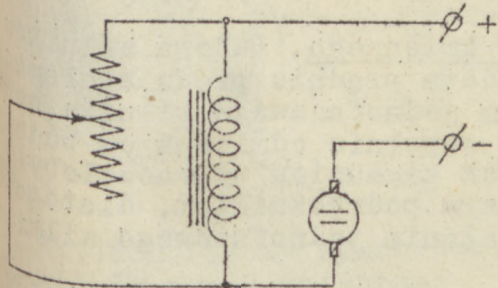
Ta ostatnia metoda jest najpowszechniej stosowana, ponieważ regulację taką jest bardzo łatwo przeprowadzić przez umieszczenie opornika regulowanego w obwodzie magneśnicy dowolnego typu silnika.

W silniku bocznikowym szybkość obrotów może być zwiększona przez szeregowe włączenie opornika w uzwojenia magneśnicy /rys.153 / . Im oporność obwodu magneśnicy będzie większa, tym i szybkość obrotów będzie się zwiększać. Szybkość obrotów zmniejszyć można poza tym przez włączenie szeregowe opornika w uzwojenia wirnika, ten sposób jednak ma szereg wad, a mianowicie:

- zmiana szybkości obrotów wirnika jest bardziej zależna od obciążenia, ponieważ w miarę wzrostu prądu, przepływającego przez uzwojenia wirnika, zwiększa się spadek napięcia na samym oporniku;

- moc silnika zostaje zmniejszona w tym samym stosunku, co i szybkość obrotów;
- sprawność się zmniejsza, ponieważ część energii elektrycznej zużywa się na wytworzenie ciepła na oporniku.

W silniku szeregowym najlepszą metodą regulacji szybkości obrotów jest umieszczenie w uzwojeniach magnesy oporu bocznikowego rys.154 /. W miarę zmniejszania oporu tego opornika, coraz to mniejszy prąd płynie przez uzwojenia magnesy, co pociąga za sobą zmniejszenie natężenia jej pola magnetycznego, a zatem zwiększenie szybkości obrotów.



W silniku szeregowo-bocznikowym można użyć albo opornika, włączonego szeregowo do równoległych uzwojeń magnesy, albo opornika równoległego, bocznikującego szeregowo jej uzwojenia.

Rys.154.Regulacja szybkości obrotów w silniku szeregowym.

Obliczanie sprawności silników. Chcąc obliczyć sprawność dowolnego silnika, musimy sobie przypomnieć, że na podstawie poprzednich rozważań napięcie, przyłożone do zacisków silnika, równa się sumie siły przeciwelektromotorycznej i spadku napięcia na oporze wewnętrznym silnika. A więc

$$U = E + I_w R_w.$$

Jeżeli pomnożymy obie strony tego równania przez I_w , to otrzymamy

$$U I_w = E I_w + I_w^2 R_w.$$

Wyrażenie $I_W^2 R_W$ odpowiada stratom mocy na oporze wewnętrznym w silniku, a iloczyn $E I_W$ odpowiada mocy elektrycznej, bezpośredniej przetworzonej na moc mechaniczną.

Stąd sprawność silnika elektrycznego

$$\eta = \frac{\text{moc mechaniczna na wyjściu}}{\text{moc elektryczna na wejściu}} = \frac{E I_W}{U I_W} = \frac{E}{U}$$

Po pomnożeniu wyniku przez 100, otrzymamy sprawność procentową.

6. Jednofazowy silnik synchroniczny prądu zmiennego. Budowa silników prądu stałego jest taka sama, jak i budowa prądnic prądu stałego. W silniku prądu zmiennego, za wyjątkiem jednofazowego silnika synchronicznego, konstrukcja jest na ogół zupełnie odmienna od budowy prądnic prądu zmiennego. Poruszenie tych zagadnień wykraczałoby znacznie poza ramy, określone niniejszym podręcznikiem, dlatego też omówimy jedynie ogólnie zasadę działania jednofazowego silnika synchronicznego.

Budowa takiego silnika niczym się nie różni od budowy prądnicy prądu zmiennego, w której na wirnik nawinięte są uzwojenia magnetycznej, a na wewnętrznej części obudowy są występy z wyłobieniami, w których znajdują się uzwojenia nieruchomego twornika /rys.155/.

Synchronizacja w takim silniku polega na tym, że szybkość obrotów wirnika musi być zgrana z częstotliwością prądu w uzwojeniach, nawiniętych na występy statora. Na rys.156 a i b mamy zilustrowaną zasadę działania takiego silnika.

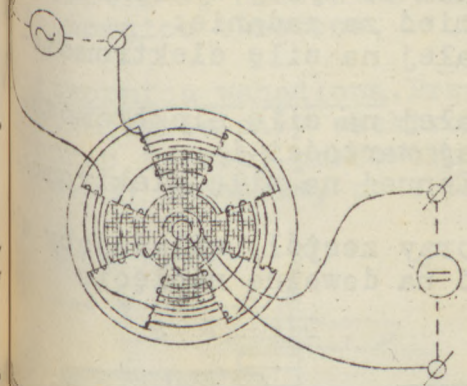
Przypuśćmy, że wirnik na tym rysunku obraca się w kierunku, zgodnym z ruchem wskazówek zegara i że w pewnym momencie, gdy prąd, przepływający przez uzwojenia statora, ma największe natężenie, a natężenie pola magnetycznego, powstałego wskutek tego uzwojenia, jest również największe, wirnik zajmuje położenie, jak na rys.156 a.

Wzajemne działanie na siebie linii sił obu pól magnetycznych, tj. wirnika i statora, wywołuje ruch wirnika w kierunku, zgodnym z kierunkiem obrotu wskazówek zegara. Jeżeli szybkość obrotów wirnika jest

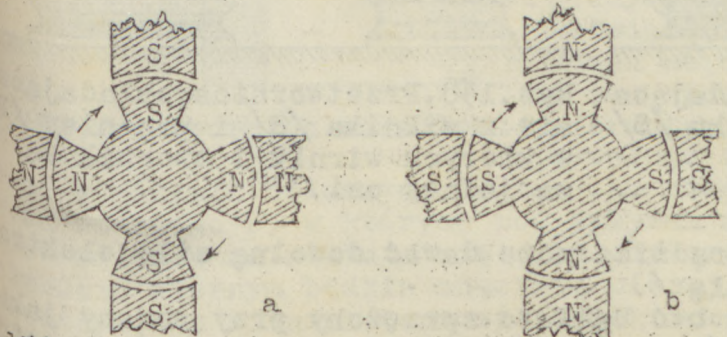
taka, że bieguny jego znajdują się naprzeciw następnych biegunów statora akurat w momencie, gdy w tych biegunach statora biegunowość się odwróci, to ruch wirnika w dalszym ciągu odbywać się będzie w tym samym kierunku.

Zasada synchronizacji polega zatem na obracaniu się wirnika z taką szybkością, aby jego bieguny przesuwały się od jednego bieguna statora do następnego akurat w ciągu czasu, potrzebnego na zmianę kierunku przepływu prądu przez uzwojenia następnego bieguna statora, a więc w ciągu jednego półokresu. Jak

więc widzimy, szybkość obrotów twornika w takim silniku zależy zarówno od częstotliwości przyłożonego napięcia zmiennego, jak i od ilości biegunów w magnetycy, a zatem i w wirniku.



rys. 155. Jednofazowy synchroniczny silnik prądu zmiennego.

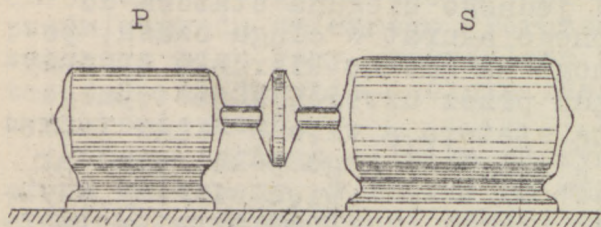


rys. 156. Ilustracja zasady działania jednofazowego synchronicznego silnika prądu zmiennego.

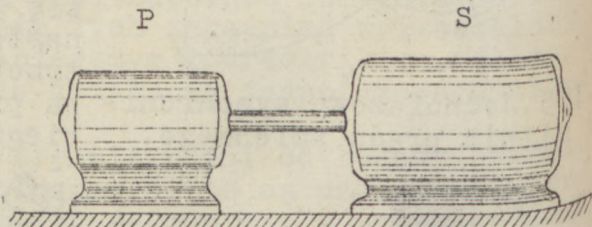
7. Przetwornice obrotowe. Bardzo często zdarza się, że mamy do dyspozycji źródło siły elektromotorycznej zmiennej, a potrzebne nam jest napięcie stałe. W takich wypadkach możemy zastosować tzw. przetwornice, których rola nie ogranicza się jednak do wyżej wymienionego szczególnego wypadku. Przetwornice mogą mieć za zadanie:

- zamianę siły elektromotorycznej stałej na siłę elektromotoryczną zmienną,
- zamianę siły elektromotorycznej stałej na siłę elektromotoryczną również stałą, ale o większej wartości i
- zamianę siły elektromotorycznej zmiennej na siłę elektromotoryczną stałą.

Najpopularniejszy typ przetwornicy tworzy zespół, składający się z silnika i prądnicy. Silnik ten może być na dowolne napięcie



Rys. 157. Przetwornica, składająca się ze sprzężonego silnika /S/ z prądnicą /P/.



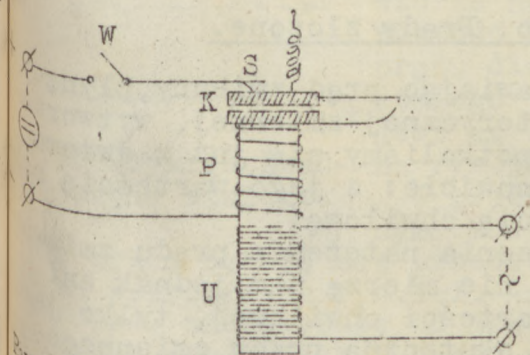
Rys. 158. Przetwornica, składająca się z silnika /S/ i prądnicy /P/, w których wirnik i twornik są na jednej osi.

/zmiennie lub stałe /, a prądnica może dawać dowolną siłę elektromotoryczną /zmienną lub stałą /.

Silnik z prądnicą może być bądź to sprzężony przy pomocy jakiegoś specjalnego sprzęgła /rys. 157 /, bądź też rozwiązanie konstrukcyjne polegać może na osadzeniu wirnika silnika i twornika prądnicy

na jednym wale /rys.158/. Często również spotyka się przetwornice, których korpus wirnika i twornika jest wspólny, a tylko uzwojenia i szczotki są oddzielne. Wyżej opisane przetwornice stanowią tzw. przetwornice obrotowe.

Przetwornica wahadłowa. Przetwornice obrotowe są dość kosztowne. Dla przetwarzania siły elektromotorycznej stałej na zmienną można użyć znacznie tańszej przetwornicy wahadłowej, która zbudowana jest na tej samej zasadzie, co i dzwonek na prąd stały /rys.159/.



Rys.159. Przetwornica wahadłowa.

Do zamknięcia obwodu prądu stałego wyłącznikiem W, prąd płynie przez styk S, kotwiczkę K i uzwojenia obwodu pierwotnego P, wskutek czego rdzeń żelazny, na który uzwojenia te są nawinięte, namagnesuje się i przyciągnie kotwiczkę K, przerywając obwód. Rdzeń się rozmagnesuje, a sprężynka O odciągnie kotwiczkę K, zamykając znowu obwód. Rdzeń napowrót się namagnesuje i w ten sposób otrzymany w obwodzie pierwotnym prąd pulsujący, który wywołuje zmianę strumienia magnety-

cznego w rdzeniu żelaznym. Na ten sam rdzeń nawinięte są uzwojenia obwodu wtórnego U, w których pod wpływem zmian strumienia magnetycznego w rdzeniu zaindukuje się siła elektromotoryczna zmienna. Jeżeli w obwodzie wtórnym będzie znacznie więcej zwojów, niż w obwodzie pierwotnym, to zaindukowana siła elektromotoryczna będzie miała znacznie większą wartość, jak bowiem pamiętamy, wielkość jej zależy od szybkości zmian strumieniczwojów.

Prócz wyżej opisanych prądnic, silników i przetwornic, istnieją jeszcze cały szereg typów maszyn elektrycznych, omówienie ich wykracza jednak poza ramy niniejszego podręcznika.

C z ę ś ć VII.

PRĄDY ZMIENNE.

R o z d z i a ł 1.

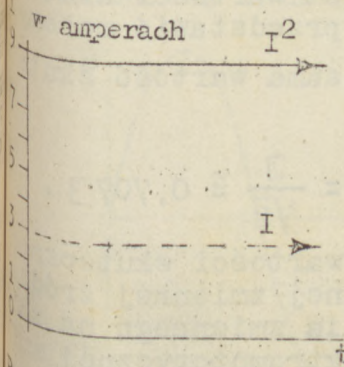
Wartość skuteczna prądu zmiennego. Prądy złożone.

1. Wartość skuteczna prądu zmiennego. Omawiając prąd zmienny, płynący w obwodzie pod wpływem siły elektromotorycznej zmiennej, wytworzonej przez prądnicę prądu zmiennego, spotkaliśmy się już z dwiema różnymi wartościami tego prądu, a mianowicie: z jego wartością największą czyli amplitudą i jego wartością chwilową.

Przyrządy, które służą nam do mierzenia natężenia prądu zmiennego, tj. amperomierze na prąd zmienny, nie mierzą nam jednak ani amplitudy prądu zmiennego, ani jego wartości chwilowej, tylko jego tzw. wartość skuteczną. Przez wartość skuteczną prądu zmiennego rozumieć należy natężenie, jakiego musiał mieć jakiś prąd stały, przepływający przez ten sam opór, co i mierzony przez nas prąd zmienny i wydzielający taką samą moc w tym oporze.

Jeżeli do pomiaru prądu zmiennego zastosujemy amperomierz ciepły, tj. taki przyrząd, w którym wychylenie się wskazówki zależy od stopnia rozgrzania się napinającego ją drucika, to pośrednio kątem, o jaki się wskazówka na skali wychyli, zależny będzie od mocy prądu: $P = I^2 R$.

Wartość oporu w tym wyrażeniu jest niezmienna. Gdy mamy do czynienia z prądem stałym, to i natężenie jego przez cały czas będzie niezmiennie. A zatem wartość skuteczną prądu stałego możemy w każdej



chwili łatwo obliczyć przez wyciągnięcie pierwiastka 2-go stopnia z kwadratu prądu, występującego we wzorze na moc. Wartość kwadratu prądu dla prądu stałego podana jest na wykresie na rys.160.

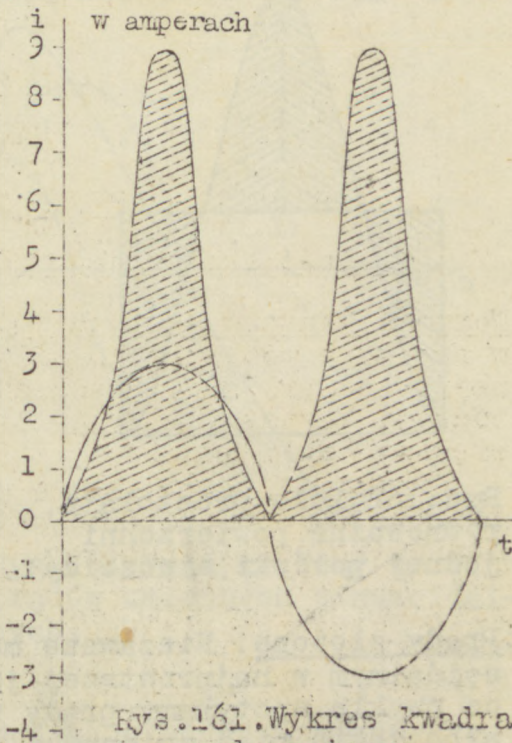
rys.160. Wykres kwadratu prądu stałego.

W prądzie zmiennym krzywa kwadratu prądu będzie się przedstawiała,

jak na wykresie na rys.161. Należy zauważyć, że, niezależnie od tego, czy natężenie prądu jest w danej połowie ujemne, czy dodatnie, kwadrat jego będzie zawsze dodatni.

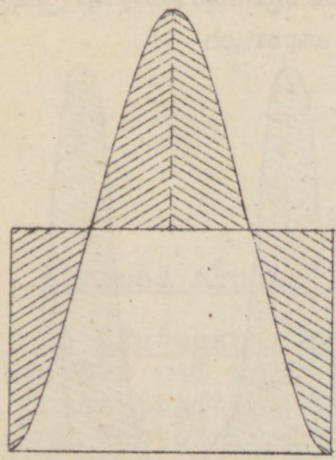
Jeżeli przypomnimy sobie teraz, że energia elektryczna, która zostanie zamieniona na energię cieplną w amperometry tego typu, da się przedstawić

polem, zakreskowanym na wykresie na rys.161, to z rys.162 zrozumiemy, że całkowita energia, jaka zostanie zamieniona na ciepło przy przepływie prądu zmiennego w obwodzie, będzie zależna od wyrażenia $\frac{I^2}{2}$.



rys.161. Wykres kwadratu prądu zmiennego.

Każde pole, wyznaczone przez dowolną sinusoidę na wykresie, da się bowiem przedstawić polem prostokąta o takiej samej podstawie, ale o wysokości, równej połowie jej amplitudy.



Jeżeli zatem kwadrat wartości skutecznej prądu zmiennego przedstawić możemy wyrażeniem $\frac{J^2}{2}$, to sama wartość skuteczna prądu zmiennego

$$I_{sk} = \sqrt{\frac{J^2}{2}} = \frac{J}{\sqrt{2}} \approx 0,707 J.$$

To samo tyczy się wartości skutecznej siły elektromotorycznej zmiennej źródła i ewentualnie napięcia zmiennego na zaciskach źródła siły elektromotorycznej zmiennej.

Przykład.

Obliczyć amplitudę napięcia w sieci prądu zmiennego o napięciu nominalnym 200 V.

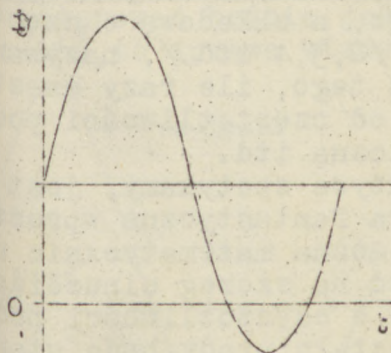
Odpowiedź. 282,8 V.

Rys.162. Pole prostokąta, równoważne powierzchni jednej połówki sinusoidy.

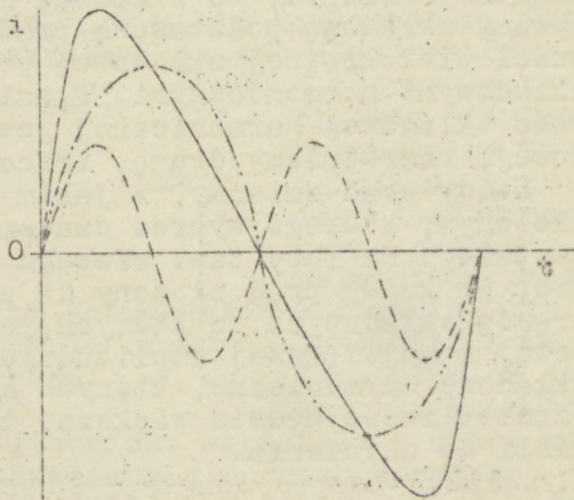
2. Prądy złożone. Niezawsze mamy do czynienia z prądem zmiennym sinusoidalnym w najprostszej jego postaci. Wprost przeciwnie, w praktyce zwykle spotykamy prądy zmienne złożone, w skład których wchodzi albo jakiś prąd zmienny i prąd stały, wzajemnie na siebie nałożone, albo też kilka nałożonych na siebie prądów zmiennych o różnych amplitudach i częstotliwościach.

Na rys.163 mamy podany najprostszy przypadek nałożenia prądu zmiennego na prąd stały. W ciągu jednego kompletnego okresu moc,

sił tworzoną w obwodzie, w którym ten prąd złożony płynie, wynosić będzie dla prądu stałego $I^2 R$, a dla prądu zmiennego $\frac{I^2}{2} R$. Stąd wartość skuteczną takiego prądu złożonego otrzymamy przez wyciągnięcie



Rys. 163. Prąd zmienny, nałożony na prąd stały.



Rys. 164. Prąd, złożony z dwóch prądów zmiennych sinusoidalnych.

kwadratów kwadratowego z sumy kwadratów obu prądów składowych. A zatem w tym wypadku

$$I_{sk} = \sqrt{I^2 + \frac{I^2}{2}}$$

Przykład.

Obliczyć wartość skuteczną prądu złożonego, w którym składowa mała $I = 9 \text{ mA}$, a amplituda składowej zmiennej $I = 6 \text{ mA}$.

Odpowiedź. 9,95 mA.

Wykres najprostszego prądu, złożonego z dwóch prądów zmiennych, z których jeden jest o częstotliwości dwukrotnie większej, niż drugi, podany mamy na rys.164. Gdy mamy do czynienia z tego rodzaju prądem złożonym, to składową jego o częstotliwości najmniejszej nazywamy składową podstawową prądu złożonego, a składową o częstotliwości wielokrotnej składowej podstawowej /2,3,4 itd./, nazywamy składowymi harmonicznymi. W zależności od tego, ile razy częstotliwość składowej harmonicznej jest większa od częstotliwości podstawowej, rozróżniamy drugą, trzecią harmoniczną itd.

Każdy prąd zmienny, z jakim się w praktyce spotykamy, jest prądem złożonym, którego wykres czasami przybiera fantastyczne wprost kształty. Na mocy tzw. szeregu Fourriera można matematycznie udowodnić, że każdy prąd złożony da się rozłożyć na szereg sinusoidalnych prądów składowych, z których jeden będzie o częstotliwości podstawowej i największej amplitudzie, zaś pozostałe prądy będą stanowiły składowe harmoniczne, których amplitudy będą tym mniejsze, im ich częstotliwość będzie większa, tzn. z im wyższą harmoniczną będziemy mieli do czynienia.

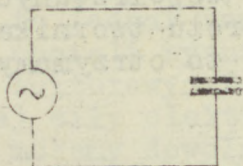
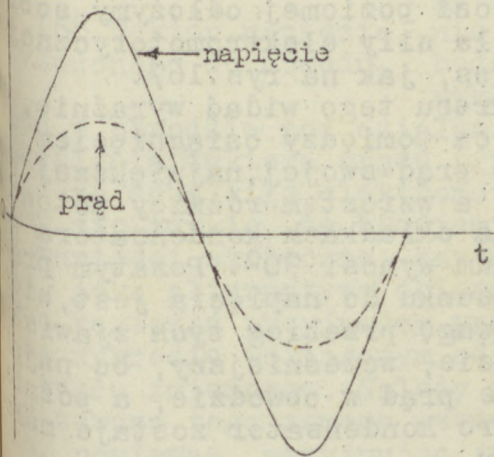
R o z d z i a ł 2.

Opory rzeczywiste i urojone w obwodzie prądu zmiennego.

1. Opór rzeczywisty w obwodzie prądu zmiennego. Jeżeli prąd zmienny przepływać będzie przez obwód, w którym będzie występował tylko jakiś opór, a nie będzie w nim żadnej indukcyjności, ani pojemności, to wykres napięcia zmiennego w tym obwodzie oraz prądu da się przedstawić tak, jak na rys.165. Widzimy, że gdy napięcie w obwodzie rośnie, to i prąd rośnie; gdy napięcie maleje, to i prąd maleje; gdy napięcie poczyna rosnąć w kierunku przeciwnym, to i prąd narasta.

kierunku przeciwnym. Krótko mówiąc, określamy to zwrotem, że napięcie i prąd są ze sobą w fazie.

pojemność w obwodzie prądu zmiennego. Jeżeli w obwodzie prądu zmiennego występował będzie jakaś pojemność, np. jakiś kondensator, jak na rys. 166, to sprawa wtedy będzie przedstawiała się nieco inaczej.



Rys. 166. Kondensator w obwodzie prądu zmiennego.

W pierwszej chwili, gdy różnica potencjałów na okładkach kondensatora wynosi zero, popłynie największy prąd ładowania, zaś różnica potencjałów na jego okładkach będzie

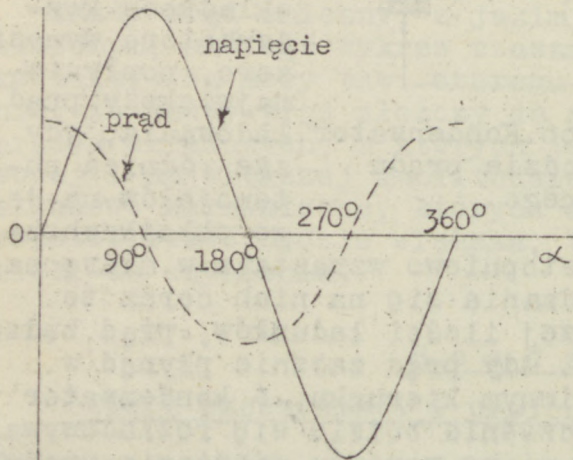
stopniowo wzrastała w miarę nagromadzania się na nich coraz to większej ilości ładunków, prąd będzie malał. Gdy prąd zacznie płynąć w przeciwnym kierunku, a kondensator jednocześnie będzie się rozładowywał, w miarę wzrostu natężenia prądu w przeciwnym kierunku, różnica potencjałów na okładkach kondensatora będzie malała. Gdy następnie konden-

rys. 165. Rozkład prądu i napięcia w obwodzie prądu zmiennego, to, w miarę wzrostu natężenia prądu, którym występuje tylko opór rzeczywisty.

tor całkowicie się rozładuje, płynący ciągle w przeciwnym kierunku prąd naładuje kondensator tak, że znaki na jego okładkach się wzmocnią, a różnica potencjałów osiągnie swą największą wartość wtedy, gdy płynący w przeciwnym kierunku prąd zmalał do zera, tak samo zresztą, jak się to działo, gdy prąd płynął w kierunku

poprzednim. Widzimy z tego, że w tym wypadku napięcie /albo różnica potencjałów/ na okładkach kondensatora nie osiąga swej wartości najwyższej wtedy, gdy prąd, płynący w obwodzie, lub gdy napięcie przyłożone, ma wartość największą. Tutaj napięcie na okładkach kondensatora, prąd, płynący w obwodzie, i napięcie przyłożone nie są ze sobą w fazie.

Jeżeli na układzie współrzędnych na osi poziomej odłożymy sobie teraz wartość kąta obrotu twornika źródła siły elektromotorycznej zmiennej w stopniach, to otrzymamy wykres, jak na rys.167.



Rys.167. Rozkład prądu i napięcia w obwodzie prądu zmiennego, w którym występuje tylko kondensator.

sojdy by były nieco skomplikowane i niewygodne. Dlatego też przeważnie do przedstawienia graficznego napięć i prądów zmiennych stosujemy wektory, ponieważ zarówno napięcie, jak i prąd zmienny, mają swoją

Z wykresu tego widać wyraźnie, że różnica pomiędzy osiągnięciem przez prąd swojej największej wartości a wzrostem różnicy potencjałów na okładkach kondensatora do maximum wynosi 90° . Poza tym prąd w stosunku do napięcia jest, biorąc pod uwagę przebieg tych zjawisk w czasie, wcześniejszy, bo najpierw płynie prąd w obwodzie, a później dopiero kondensator zostaje naładowany.

Wiemy o tym, że wszystkie wielkości, które mają określoną wartość i kierunek, dadzą się przedstawić przy pomocy wektorów. Z takiego wykresu na rys.167 widzimy, że przedstawianie napięcia i prądu zmiennego metodą wykreślenia sinusoid

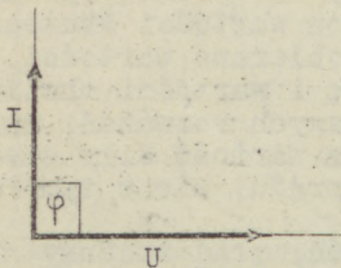
określoną wartość i fazę. W tym celu wykreślamy linię poziomą, na której obieramy sobie dowolny kierunek /w prawo lub w lewo/ i, przywzyszy dowolną podziałkę, odcinamy wektor bądź to siły elektromotorycznej zmiennej w obwodzie, bądź też napięcia przyłożonego /rys.168/. Zazwyczaj przyjmujemy za kierunek działania tej siły elektromotorycznej kierunek w prawo,

rys.168. Wektor napięcia, nie jest to jednak konieczne. Jeżeli teraz przyłożonego do obwodu, będziemy chcieli wyznaczyć na tym samym wykresie wektorowym fazę przepływającego prądu w obwodzie pod działaniem tej siły elektromotorycznej, to dla określenia wektora prądu przyjąć możemy dowolną podziałkę. Porównując ze sobą siłę elektromotoryczną zmienną i zmienny prąd, umiemy się zwykle, że będziemy porównywali ze sobą ich amplitudy, wartości skuteczne, czy wreszcie wartości chwilowe. Obojętne jest, jaką alternatywę obierzemy; jeśli za podstawę jednak do naszych rozważań przyjmujemy wartość skuteczną siły elektromotorycznej, na wykresie wektorowym odkładamy zwykle wektor wartości skutecznej prądu zmiennego. Należy przestrzegać, aby dobrane wartości były zawsze tego samego rzędu. To samo tyczy się i wartości chwilowych, ponieważ, przyjmując je za podstawę do naszych rozważań, musimy zwrócić uwagę na to, aby przyjęta, chwilowa wartość siły elektromotorycznej, odpowiadała wartości chwilowej prądu, ale w tym samym momencie.

W obwodzie, w którym występuje jakaś pojemność, prąd zmienny nie będzie w fazie z napięciem przyłożonym, ale będzie je wyprzedzał. Aby przedstawić przebieg tego zjawiska na wykresie wektorowym, wykreślamy prostopadłą do wektora przyłożonego napięcia do obwodu i na niej, w skali, przyjętej dla I , odkładamy wektor prądu przepływającego w tym obwodzie.

Należy zaznaczyć, że na ogół utarł się zwrot, iż prąd zmienny przepływa przez kondensator. W rzeczywistości przez kondensator prąd zmienny nie płynie, a pod jego wpływem ładują się tylko obie okładki kondensatora naprzemiennie dodatnio i ujemnie. Z obu okładek kondensatora odpływają więc i dopływają do nich nieustannie ładunki elektryczne. Mimo zatem, że przez kondensator prąd nie płynie, to jednak w przewodach, łączących go z obwodem, następuje przepływ ładunków elektrycznych czyli przepływ prądu. Stąd więc, pomimo że przyjęty zwrot nie jest poprawny, to obrazuje on jednak dokładnie przebieg zjawiska przepływu prądu w samym obwodzie.

Dla dokładnego zobrazowania przebiegu przepływu prądu przez kondensator z uwzględnieniem czasu, w jakim ten przepływ prądu zachodzi, utarło się przyjmować na wykresie wektorowym położenie wektora za zgodne z położeniem wskazówek zegara, ale o kierunku ruchu odwrotnym. Jeżeli więc weźmiemy pod uwagę, że przepływ prądu przez kondensator jest przesunięty w fazie o 90° w stosunku do przyłożonego napięcia i jest od niego wcześniejszy, to



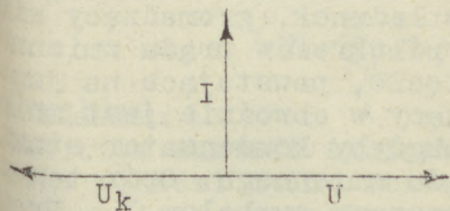
Rys. 169. Wektory napięcia przyłożonego i prądu, płynącego w obwodzie, w który włączony jest kondensator.

wektor prądu na wykresie skierować należy ku górze, dla zobrazowania tej wzajemnej zależności zachodzących zjawisk /rys. 169/.

Kąt pomiędzy wektorem prądu i wektorem przyłożonego napięcia nazywamy kątem przesunięcia fazowego i oznaczamy grecką literą φ . W tym wypadku $\varphi = 90^\circ$.

Jeżelibyśmy chcieli na tym wykresie postawić również wektor napięcia, jakie wstaje na okładkach kondensatora wskutek gromadzących się na nich ładunków, to runek tego napięcia byłby odwrócony o 180° w stosunku do napięcia przyłożonego /rys. 170/.

Gdy bowiem przyłożone napięcie równa się zeru, to i napięcie na okładkach kondensatora równa się zeru; gdy zaś wartość przyłożonego napięcia wzrasta w jednym kierunku, to wartość napięcia, powstałego na obu okładkach kondensatora, wzrasta w kierunku przeciwnym



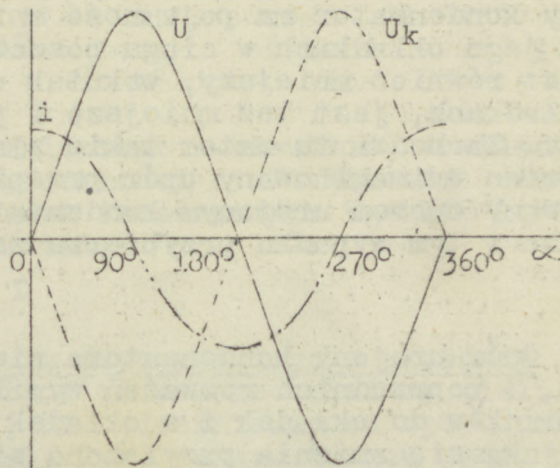
rys.170. Wektory napięcia przyłożonego /U/, napięcia na okładkach kondensatora /U_k/ i prądu, płynącego w obwodzie, w który włączony jest kondensator.

W skutek gromadzenia się na nich ładunków tego samego znaku, co i na biegunach źródła ładującego. W zwykłym wykresie, nie wektorowym, ten stan rzeczy da się przedstawić trzema sinusoidami, jak na rys.171.

Wielkość prądu, płynącego w tym obwodzie, da się obliczyć z prawa Ohma:

$$I = \frac{E}{R}$$

W tym wypadku R jest oporem, jaki stawia kondensator przepływowi prądu w obwodzie. Gdybyśmy mieli do czynienia z prądem stałym, to



Rys.171. Trzy sinusoidy, przedstawiające napięcie przyłożone /U/, napięcie na okładkach kondensatora /U_k/ i prąd, płynący w obwodzie, w który włączony jest kondensator.

opór kondensatora byłby nieskończenie wielki, bo przez kondensator prąd stały nie przepływa. Prąd zmienny co prawda również nie przepływa przez kondensator, w samym jednak obwodzie, w który włączony jest kondensator, prąd zmienny płynie, natężenie jego zależne jest jednak od szybkości ładowania się i rozładowywania okładek kondensatora. Gdy kondensator ma pojemność mniejszą, to ładunek, gromadzący się na jego okładkach w ciągu poszczególnych półokresów prądu zmiennego jest również mniejszy, wskutek czego napięcie, powstające na jego okładkach, jest też mniejsze i prąd, płynący w obwodzie, jest mniejszy. Zachodzi tu zatem takie zjawisko, jak gdyby kondensator stawiał pewien wyimaginowany opór przepływowi prądu zmiennego. Opór ten nazywamy oporem urojonym kondensatora i oznaczamy symbolem X_C . Prawo Ohma w tym wypadku przybierze zatem postać:

$$I = \frac{E}{X_C}.$$

Opór urojony kondensatora nie zależy wyłącznie od jego pojemności. Z poprzednich rozważań wynika, że wpływ na szybkość przepływu ładunków do okładek i z okładek kondensatora ma również i szybkość, z jaką się zmienia przyłożona siła elektromotoryczna zmienna. Szybkość tę, jak wiemy, określiliśmy mianem szybkości kątowej i oznaczyliśmy symbolem ω . Im szybkość kątowa zmian przyłożonej siły elektromotorycznej jest większa, tym i napięcie, powstające na okładkach kondensatora, jest większe, a więc ilość ładunków, przepływających przez przewody, jakimi kondensator jest połączony z obwodem, jest mniejsza. Nie należy bowiem zapominać, że napięcie, powstające na okładkach kondensatora, ma kierunek przeciwny kierunkowi działania przyłożonej siły elektromotorycznej. A zatem opór urojony kondensatora X_C zależy zarówno od szybkości zmian przyłożonej siły elektromotorycznej ω , jak i od pojemności kondensatora C , przy czym stosunek pomiędzy wartością oporu urojonego kondensatora a tymi dwiema wielkościami jest odwrotnie proporcjonalny. Wynika z tego, że

urojony kondensatora przedstawimy możemy następującym wzorem:

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

Stąd prawo Ohma przekształcić możemy, jak następuje:

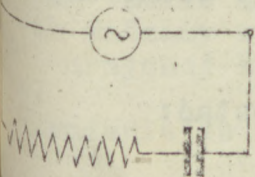
$$I = \frac{E}{X_C} = \frac{E}{\frac{1}{\omega C}} = E\omega C$$

Przykład.

Obliczyć wartość skuteczną prądu zmiennego w obwodzie, w skład którego wchodzi tylko kondensator o pojemności $4 \mu F$. Wartość skuteczna napięcia, przyłożonego do okładek kondensatora $U_C = 200 V$, częstotliwość jego zmian $f = 50 \sim / \text{sek}$.

Odpowiedź: 251,2 mA.

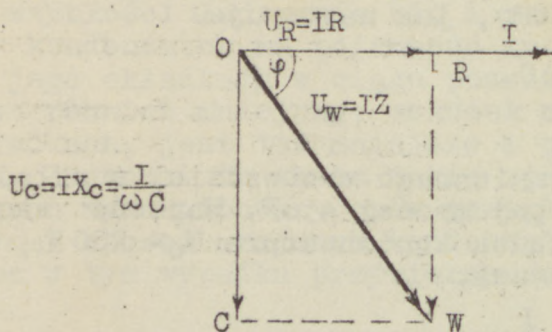
Szeregowe połączenie pojemności i oporu rzeczywistego w obwodzie prądu zmiennego. Jeżeli w obwodzie prądu zmiennego będziemy mieli kondensator i jakiś opornik, który, dla odróżnienia od oporu urojonego kondensatora, będziemy określali jako mający pewien opór rzeczywisty, to układ ten w wypadku, gdy źródło siły elektromotorycznej zmiennej, kondensator i opór będą ze sobą połączone szeregowo, da się przedstawić schematycznie, jak na rys. 172.



W obwodzie tym będziemy mieli dwa spadki napięć, składające się na napięcie wypadkowe czyli przyłożone: spadek napięcia na oporze rzeczywistym, będący w fazie z przepływającym przez obwód prądem, i spadek napięcia na oporze urojonym pojemności, opóźniony w fazie

rys. 172. Szeregowo połączony kondensator i opornik w obwodzie prądu zmiennego.

o 90° w stosunku do prądu. Znalezienie napięcia przyłożonego nie przedstawia sobą żadnych trudności, jeżeli znamy składowy spadek napięcia na oporze rzeczywistym $/IR/$ i napięcie składowe, powstające



$$U_c = IX_c = \frac{I}{\omega C}$$

Rys.173. Wykres wektorowy napięcia wypadkowego w obwodzie z rys.172.

przyłożone, równe iloczynowi płynącego w obwodzie prądu i oporności całkowitej obwodu, którą w obwodzie prądu zmiennego oznaczamy literą Z, otrzymamy:

$$(IZ)^2 = (IR)^2 + \left(\frac{I}{\omega C}\right)^2.$$

Po rozwinięciu tego wyrażenia, przybiera ono postać:

$$I^2 Z^2 = I^2 R^2 + \frac{I^2}{\omega^2 C^2}.$$

Dzieląc obie strony tego równania przez I^2 , będziemy mieli

$$Z^2 = R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}.$$

na okładkach kondensatora ($IX_c = I/\omega C$). Wektor napięcia wypadkowego czyli napięcia przyłożonego znajdziemy na wykresie wektorowym przez wykreślenie przekątnej prostokąta, utworzonego z wektorów składowych /rys.173/. Z trójkąta ORW:

$$(OW)^2 = (OR)^2 + (RW)^2.$$

Podstawiając za wektor OR spadek napięcia na oporze rzeczywistym IR, za wektor RW - spadek napięcia na oporze urojonym kondensatora $/IX_c/$, a za wektor OW - napięcie

Stąd oporność całkowita układu

$$Z = \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}$$

Z tego samego wykresu wyznaczyć możemy kąt przesunięcia fazowego φ .

Jeżeli w trójkącie prostokątnym ORW kąt przesunięcia fazowego odpowiada kątowi ROW, to wyznaczyć go będziemy mogli ze stosunku obu przyprostokątnych tego trójkąta. Stosunek przyprostokątnej, przeciwległej danemu kątowi, do drugiej przyprostokątnej, nazywamy w trójkącie prostokątnym tangensem danego kąta. Tangens kąta φ pisze się w skrócie $\text{tg. } \varphi$. W danym trójkącie:

$$\text{tg. } \varphi = \frac{RW}{OR} = \frac{\frac{I}{\omega C}}{IR} = \frac{1}{\omega CR}$$

Po obliczeniu wyrażenia $\frac{1}{\omega CR}$, wartość kąta φ znajdziemy z dowolnych tablic matematycznych.

Jak widzimy z powyższego wzoru, $\text{tg. } \varphi$ odpowiada stosunkowi oporności urojonej kondensatora do oporności rzeczywistej w tym obwodzie.

Wyrażenie to można uprościć nieco, ponieważ

$$\text{tg. } \varphi = \frac{1}{\omega CR} = \frac{1}{\omega CR}$$

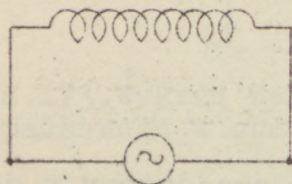
Przykład.

Do obwodu, składającego się z oporu $R = 10000 \Omega$ i kondensatora o pojemności $C = 0,01 \mu\text{F}$ przyłożone zostało napięcie $U = 100 \text{ V}$, zmieniające się z częstotliwością $f = 1 \text{ kc/s}$. Obliczyć spadek napięcia na oporze rzeczywistym i na kondensatorze oraz tangens kąta

przesunięcia fazowego pomiędzy napięciem przyłożonym i spadkiem napięcia na oporze rzeczywistym.

Odpowiedź. 53,2 V. ; 84,7 V. ; $\text{tg. } \varphi = 1,59$.

4. Indukcyjność w obwodzie prądu zmiennego. Gdy w obwód prądu zmiennego włączona jest jakaś indukcyjność /rys.174/, prąd zmienny, przepływający w obwodzie, wywołuje zaindukowanie się siły przeciwelektromotorycznej samoindukcji, która się przeciwstawia przepływowi tego prądu. Aby zatem przez obwód, w który włączona jest indukcyjność,



Rys.174. Indukcyjność w obwodzie prądu zmiennego.

przepływał prąd, napięcie przyłożone musi być zwyciężyło siłę przeciwelektromotoryczną samoindukcji, to też w każdym momencie musi jej być równe i przeciwne.

Dla prądu stałego indukcyjność w tym obwodzie nie stanowiłaby żadnego oporu, jeżeli pominie my nieznaczny opór rzeczywisty uzwojeń zwojniczy, wykonanej zazwyczaj z drutu miedzianego. W obwodzie, w którym płynie prąd zmienny, indukcyjność, jak już wiemy, stawia opór przepływającemu prądowi zmiennemu, ile wszędzie

jego zmianom, redukując w ten sposób jego narastanie i jego malonanie a zatem i jego amplitudę. Zjawisko to zachodzi dzięki indukowaniu się w zwojnicy siły przeciwelektromotorycznej, która będzie tym większa, im szybkość zmian przyłożonego napięcia będzie większa i im współczynnik indukcyjności własnej tej zwojnicy będzie większy. Jeżeli ten pozorny opór, jaki każda indukcyjność stawia przepływającemu przez nią prądowi zmiennemu, oznaczymy przez X_L , a szybkość zmian przyłożonego napięcia przez ω , to wielkość oporu urojonego przedstawić będziemy mogli wzorem:

$$X_L = \omega L,$$

W obwodzie L jest współczynnikiem indukcyjności własnej zwojnicy, włączonoj w ten obwód.

Opór urojony indukcyjności

$$X_L = \omega L = 2\pi fL$$

Widzi się w omach, przyczym wynik w powyższym wzorze otrzymamy w omach, jeśli f /częstotliwość/ podamy w okresach na sekundę, a L w henrach. Mimo analogii pomiędzy opornością urojoną indukcyjności a oporem rzeczywistym, istnieje między nimi zasadnicza różnica, ponieważ opór rzeczywisty nie zależy od częstotliwości przepływającego prądu, podczas gdy opór urojony indukcyjności wzrasta wraz z częstotliwością prądu.

Przykład.

Obliczyć opór urojony, jaki stawia zwojnica o indukcyjności

$L = 30\text{H}$ przepływającemu przez nią prądowi o częstotliwości

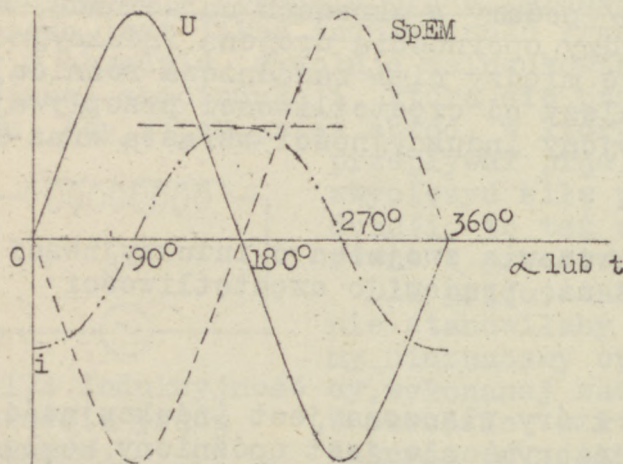
$f = 50 \sim / \text{sek.}$

Odpowiedź. 9420Ω .

Prąd, płynący w obwodzie, w który włączona jest indukcyjność, nie jest w fazie z napięciem przyłożonym, ale jest opóźniony względem niego o 90° czyli o ćwierć okresu. Aby zrozumieć istotę tego zjawiska, trzeba rozpatrzeć nie sam prąd, ale szybkość jego zmian, która, jak wiemy, decyduje o wielkości indukującej się siły przeciwelektromotorycznej. Wzajemną zależność przyłożonego napięcia, siły przeciwelektromotorycznej i prądu, płynącego w takim obwodzie, przedstawić możemy na zwykłym wykresie w formie trzech sinusoid, których wzajemne połączenie względem siebie pokazane jest na rys. 175. Z wykresu tego widzimy, że siła przeciwelektromotoryczna samoindukcji przesunięta jest w fazie w stosunku do przyłożonego napięcia o 180° , a prąd, płynący w obwodzie, opóźniony jest w stosunku

do tego napięcia o 90° .

Sinusoida, przedstawiająca nam na tym wykresie zmianę natężenia prądu $/i/$ w stosunku do czasu $/t/$, daje nam jednocześnie obraz składowości zmian prądu. W momencie, gdy prąd osiąga swą amplitudę, wierny



Rys.175. Trzy sinusoidy, przedstawiające napięcie przyłożone $/U/$, siłę przeciwelektromotoryczną, powstającą w zwojnicy $/SpEM/$ i prąd, płynący w obwodzie, w który włączona jest indukcyjność.

ważną zaznaczyliśmy, że warunkiem przepływu prądu przez indukcyjność jest przewyciężenie siły przeciwelektromotorycznej przez napięcie

chołek krzywej, jak widać wyraźnie z wykresu, jest spłaszczony, to też zmiana prądu jest zerowa, a więc i indukująca się siła przeciwelektromotoryczna będzie równa zero. Szybkość zmian prądu wtedy będzie największa, gdy prąd równa się zero. Wskazuje na to wyraźnie duże nachylenie sinusoidy prądu w tym momencie. Wynika z tego, że i indukująca się siła przeciwelektromotoryczna będzie największa w tym momencie. Określenie kierunku jej działania nie przedstawia sobą żadnych trudności, z reguły楞niamy bowiem, że zawsze przeciwdziałania się ona wszelkim zmianom prądu, a więc w każdym momencie kierunku jej będzie przeciwny kierunkowi narastania lub malenia prądu.

Na samym wstępie naszych rozważań

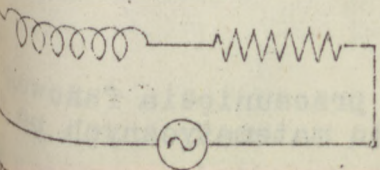
łożone, które, jak z tego wynika, musi jej być w każdym momencie równe i przeciwne. Stąd też sinusoida, przedstawiająca napięcie przyłożone, będzie miała kształt taki, jak to zostało pokazane na rys. 175 linią ciągłą.

Jak widać z powyższego wykresu i jak wynika z naszych rozważań, prąd jest w tym wypadku opóźniony w stosunku do przyłożonego napięcia o 90° , ponieważ osiąga swoją amplitudę później, niż napięcie przyłożone, a kąt przesunięcia fazowego φ równa się w tym wypadku 90° .

Jeżeli teraz przebieg tych zjawisk przedstawimy mniej skomplikowanym wykresem wektorowym /rys. 176/, to zobaczymy, że na tego rodzaju wykresie wzajemne zależności faz siły przeciw- elektromotorycznej, napięcia przyłożonego i prądu dadzą się zobrazować o wiele wyraźniej.

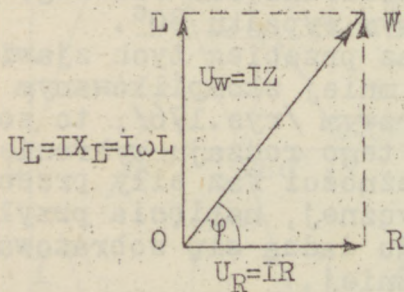
Szeregowe połączenie indukcyjności i oporu rzeczywistego w obwodzie

prądu zmiennego. Jeżeli w obwodzie, w którym płynie prąd zmienny, będziemy mieli prócz indukcyjności i opór rzeczywisty /rys. 177/, to wystąpią w nim dwa spadki napięć, składające się na napięcie wypadkowe czyli przyłożone: spadek napięcia na oporze rzeczywistym, będący w fazie z przepływającym przez obwód prądem, i spadek napięcia na oporze urojonym indukcyjności, wyprzedzający w fazie prąd o 90° . Znajdźmy



rys. 177. Szeregowo połączona indukcyjność z oporem rzeczywistym w obwodzie prądu zmiennego.

napięcia przyłożonego nie przedstawia sobą żadnych trudności. Oznaczając jeden spadek napięcia przez $U_R = IR$, a drugi spadek napięcia - przez $U_L = IX_L = I\omega L$, wzajemną zależność obu tych spadków napięcia wypadkowego przedstawić będziemy mogli wykresem wektorowym jak na rys.178. Z rysunku tego widać, że wektor napięcia wypadkowego czyli napięcia przyłożonego wykreślić możemy dotychczas stosowaną metodą jako przekątną prostokąta napięć. Z otrzymanego na tej drodze trójkąta OWR obliczyć możemy na mocy twierdzenia Pitagorasa



napięcie wypadkowe, równe iloczynowi prądu, płynącego w obwodzie, i oporu wypadkowego, który dla prądu zmiennego oznaczamy literą Z:

$$(IZ)^2 = (IR)^2 + (I\omega L)^2.$$

Podnosząc wyrażenia w nawiasie kwadratu, otrzymamy:

$$I^2 Z^2 = I^2 R^2 + I^2 \omega^2 L^2.$$

Dzieląc obie strony tego równania przez I^2 , otrzymamy:

$$Z^2 = R^2 + \omega^2 L^2,$$

Rys.178. Wykres wektorowy napięcia wypadkowego w obwodzie z rys.177.

stąd

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}.$$

W trójkącie OWR kąt ROW odpowiada kątowi przesunięcia fazowego który łatwo znaleźć możemy z dowolnych tablic matematycznych po obliczeniu wyrażenia:

$$\text{tg. } \varphi = \frac{WR}{OR} = \frac{I\omega L}{IR} = \frac{\omega L}{R}.$$

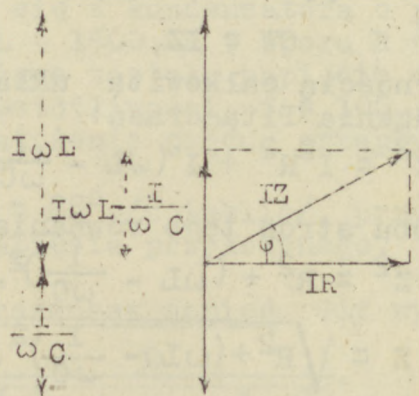
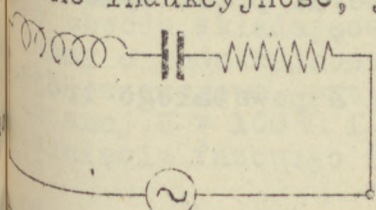
Wynika z tego, że $\text{tg. } \varphi$ daje się obliczyć ze stosunku oporu urojonego indukcyjności do oporu rzeczywistego obwodu.

Przykład.

Przez obwód, składający się z oporu $R = 20\Omega$ i zwojnicy o indukcyjności $L = 400 \mu H$, przepływa prąd o natężeniu $I = 1 A$, i częstotliwości $f = 100 \text{ kc/s}$. Obliczyć spadek napięcia na oporze rzeczywistym.

Odpowiedź. 252 V.

Szeregowe połączenie indukcyjności, pojemności i oporu rzeczywistego w obwodzie prądu zmiennego. Gdy mamy obwód, w którym występuje równo indukcyjność, jak i pojemność, oraz opór rzeczywisty /rys. 179/, to obliczenie oporu wypadkowego jest nieco bardziej skomplikowane.



Wykres wektorowy poszczególnych spadków napięć, występujących w tym obwodzie, da się przedstawić, jak na rys. 180. Wiemy o tym, że spadek napięcia na oporze urojonym indukcyjności, będzie przesunięty w fazie o 90° w stosunku

Rys. 180. Wykres wektorowy napięcia wypadkowego w obwodzie z rys. 179.

rys. 179. Szeregowo połączona pojemność z indukcyjnością i oporem rzeczywistym w obwodzie prądu zmiennego.

do spadku napięcia na oporze rzeczywistym i będzie od niego wcześniejszy. Natomiast spadek napięcia na oporze urojonym pojemności będzie również przesunięty o 90° w stosunku do spadku napięcia na oporze rzeczywistym, ale będzie od niego późniejszy. Załóżmy że

opór urojony indukcyjności jest w tym obwodzie większy od oporu jonego pojemności. Z tego wynika, że spadek napięcia na indukcyjności będzie większy od spadku napięcia na pojemności i będzie w s sunku do niego przesunięty w fazie o pełne 180° . Chcąc zatem obliczyć różnicę obu tych spadków napięć, musimy wektorowo odjąć je od siebie, jak na rys. 180, otrzymując wektor wypadkowy

$$OL = I\omega L - \frac{I}{\omega C} = I\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right).$$

Całkowite napięcie wypadkowe znajdziemy teraz przez wykreślenie wektora wypadkowego

$$OW = IZ,$$

gdzie Z będzie opornością całkowitą układu. Z powstałego trójkąta OWR, na mocy twierdzenia Pitagorasa:

$$I^2 Z^2 = I^2 R^2 + I^2 \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2.$$

Po podzieleniu obu stron tego równania przez I^2 , otrzymamy:

$$Z^2 = R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2,$$

skąd

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Wartość natężenia prądu w takim obwodzie możemy obliczyć z prawa Ohma, które dla prądu zmiennego przybiera postać:

$$I = \frac{E}{Z}.$$

Podstawiając otrzymaną przedtym wartość Z do wzoru Ohma, otrzymamy:

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}.$$

Z wykresu wektorowego na rys. 180 obliczyć możemy również kąt przesunięcia fazowego φ .

Z trójkąta OWR kąt φ równa się kątowi RCW. A zatem:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{WR}{OR} = \frac{I(\omega L - \frac{1}{\omega C})}{IR} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

Po obliczeniu $\operatorname{tg} \varphi$, wartość kąta przesunięcia fazowego znajduje się z dowolnych tablic matematycznych.

Przykład.

Do obwodu, składającego się z kondensatora o pojemności $C = 0.007 \mu\text{F}$ i cewki o indukcyjności $L = 1500 \mu\text{H}$ i oporu $R = 25 \Omega$, połączonych z sobą szeregowo, przyłożone zostało napięcie zmienne o wartości skutecznej $U = 100 \text{ V}$. i częstotliwości $f = 100 \text{ kc/s}$. Obliczyć kąt przesunięcia fazowego i natężenie prądu, przepływającego przez ten obwód.

Odpowiedź: 132 mA.; $\varphi = 88^\circ$ /z tablic/, przyczym prąd jest opóźniony w stosunku do napięcia przyłożonego.

Rezonans szeregowy czyli rezonans napięć. Gdy wyrażeniu:

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$$

licznik urojony indukcyjności równa się oporowi pozornemu pojemności

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

oraz na obliczenie wartości natężenia prądu w obwodzie przybierze

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

Całkowity obwód zachowuje się wtedy tak, jak gdyby zawierał tylko oporność rzeczywistą, bo oporności urojone pojemności i indukcyjności, przesunięte względem siebie w fazie o 180° , wzajemnie się znoszą. Stan taki nazywamy rezonans napięć tego układu, a ponieważ indukcyjność, pojemność i opór rzeczywisty połączone są ze sobą szeregowo, rezonans, występujący w tym obwodzie, będziemy nazywali rezonans szeregowym lub rezonans napięć.

Rezonans w takim układzie zależy jest od częstotliwości przyłożonego napięcia zmiennego. Wiedząc, że warunkiem rezonansu jest, aby

$$\omega L = \frac{1}{\omega C},$$

łatwo możemy obliczyć tę częstotliwość, dla której rezonans zachodzi, ponieważ

$$\omega = 2\pi f,$$

co wiemy już z poprzednich rozważań.

Mnożąc obie strony tego równania przez ω i dzieląc przez L , otrzymamy:

$$\omega^2 = (2\pi f)^2 = \frac{1}{LC}.$$

Stąd:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}.$$

Częstotliwość, dla której zachodzi w takim obwodzie zjawisko rezonansu, nazywamy częstotliwością rezonansową. Dla jej obliczenia należy podstawić wartość L w henrach, a wartość C w faradach.

Zjawisko rezonansu wywołuje szereg ciekawych zjawisk dodatkowych

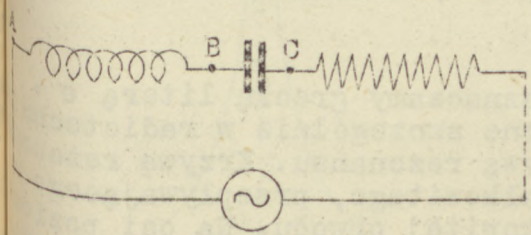
- prąd, płynący w obwodzie, jest wtedy największy, bo opór całego układu jest najmniejszy,
- prąd, płynący w obwodzie, jest w fazie z napięciem przyłożonym, bo

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = \frac{0}{R} = 0,$$

a więc kąt $\varphi = 0^\circ$;

- na pojemności i indukcyjności może wystąpić zjawisko przepięć.

Opór całkowity układu jest co prawda najmniejszy, bo oporność urojona indukcyjności i oporność urojona pojemności wzajemnie się znoś. Nie znaczy to jednak, aby sama oporność indukcyjna lub sama oporność urojona pojemności były również równe zero. Mogą one być nawet bardzo duże, warunkiem rezonansu jest tylko to, aby różnica była równa zero. Wynika z tego, że duży prąd, płynący przez stosunkowo duże cpery, dać może bardzo duże spadki napięć. Jeżeli w obwodzie, jak na rys.181, załączymy woltomierz pomiędzy punktami A i C,



to nie wykaże on nam co prawda żadnego napięcia, bo, chociaż spadki napięć na indukcyjności i na pojemności mogą być bardzo duże, to są one odwrócone względem siebie w fazie o 180° i dlatego, wzajemnie się znoszą. Natomiast pomiędzy punktami A i B oraz B i C woltomierz może nam wykazywać bardzo duże spadki napięć. Spadek napię-

Rys.181.Obwód szeregowy.

czy to na indukcyjności, czy na pojemności łatwo możemy obliczyć, ponieważ z prawa Ohma spadek napięcia na indukcyjności

$$U_L = I X_L,$$

spadek napięcia na pojemności

$$U_C = I X_C.$$

Ponieważ w rezonansie

$$I = \frac{E}{R},$$

spadki napięć na poszczególnych częściach obwodu możemy przedsta-

wiód teraz w formie:

$$U_C = \left(\frac{E}{R}\right) \cdot \frac{1}{\omega C} = E \cdot \frac{1}{R\omega C}$$

i odpowiednio:

$$U_L = \left(\frac{E}{R}\right) \cdot \omega L = E \cdot \frac{\omega L}{R}$$

Jeżeli wyrażenia

$$\frac{\omega L}{R} \text{ i } \frac{1}{\omega C R}$$

będą większe od jedności, to spadki napięć, występujące na pojemności i na indukcyjności, będą większe od napięcia przyłożonego. Zjawisko to określamy mianem przepięcia, a wyrażenia

$$\frac{\omega L}{R} \text{ i } \frac{1}{\omega C R}$$

nazywamy współczynnikami przepięć i oznaczamy grecką literą σ .

Zjawisko rezonansu jest bardzo ważne szczególnie w radiotechnice w której często operuje się tzw. krzywą rezonansu. Krzywą rezonansu wykreślić możemy bądź to dla prądu całkowitego, przepływającego w obwodzie, bądź też dla oporności całkowitej obwodu. Na osi poziomej czyli na tzw. osi odciętych odkładamy częstotliwość, od której zjawisko rezonansu jest zależne. Krzywe rezonansu przybiorą wtedy kształt, jak na rys. 182 i 183.

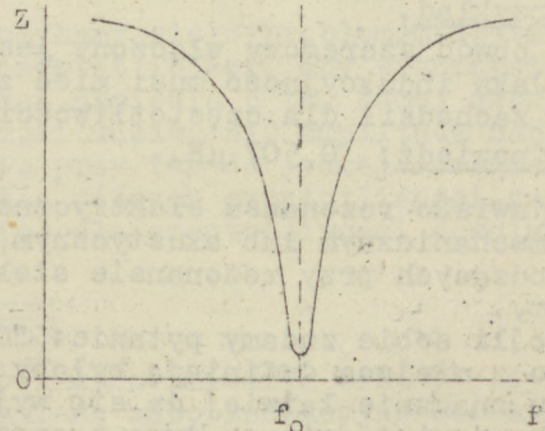
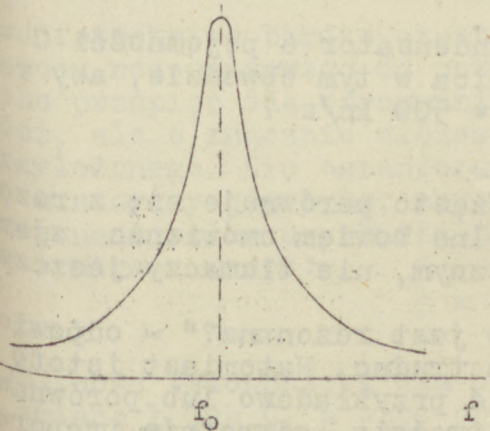
Z wykresów tych widzimy, że dla rezonansu szeregowego, zachodzącego dla częstotliwości rezonansowej

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

opór całkowity układu jest najmniejszy, a prąd, płynący w obwodzie jest największy.

Gdyby w obwodzie nie było żadnego oporu rzeczywistego, to płynąłby prąd nieskończenie wielki, ponieważ opór całkowity układu

byłyby się wtedy zeru. W praktyce jednak zawsze mamy pewne opory rzeczywiste w obwodzie, na które się składają opory samych przewodów, opór drutu, z którego nawinięta jest zwojnica, opór rzeczywisty okładki kondensatora i opór dielektryka, w którym, jak wiemy, płynie bardzo mały prąd przesunięcia, co powoduje nam straty na oporze dielektryka. Dlatego też opór całkowity obwodu nawet dla wypadku rezonansu nie maleje nigdy do zera, najmniejsza bowiem jego wartość ogra-



Rys. 182. Krzywa rezonansu prądu w obwodzie rezonansowym szeregowym.

Rys. 183. Krzywa zmiany oporności całkowitej Z dla obwodu szeregowego.

znaczona jest wielkością oporu rzeczywistego, występującego w obwodzie. Wynika z tego, że i prąd, płynący w obwodzie w wypadku rezonansu, również nie jest nieskończenie wielki. Wzrost jego natężenia ograniczony jest wielkością oporu rzeczywistego, występującego w obwodzie, co wynika z wzoru:

$$I = E \cdot \frac{\omega L}{R}.$$

Im wyrażenie $\omega L/R$ będzie większe, tym i prąd, płynący w obwodzie będzie większy, a więc krzywa rezonansu z rys.182 będzie miała wie-
rchołek znacznie wyższy, niż na tym wykresie. Odpowiednio wierzcho-
łek krzywej rezonansu z wykresu na rys.183 zbliży się znacznie do
osi poziomej.

Przykład.

W obwód szeregowy włączony jest kondensator o pojemności $C = 0,2$
 μF . Jaką indukcyjność musi mieć zwojnica w tym obwodzie, aby rezo-
nans zachodził dla częstotliwości $f = 500$ kc/s ?

Odpowiedź: 0,507 μH .

Zjawisko rezonansu elektrycznego często porównuje się z rezonan-
sem mechanicznym lub akustycznym, ogólne bowiem omówienie zjawisk
zachodzących przy rezonansie elektrycznym, nie tłumaczy jeszcze
istoty.

Jeśli sobie zadamy pytanie: "Co to jest rezonans?" - odpowiedzie-
na to z miejsca definicją, byłoby dość trudno. Natomiast istotę rezo-
nansu znacznie łatwiej da się wyjaśnić przykładowo lub porównawczo.

Np. napięta struna drga z częstotliwością, odwrotnie proporcjo-
nalną do jej długości. Im struna będzie krótsza, tym częstotliwość
jej drgań będzie większa. Jeżeli teraz będziemy chcieli "rozkołysać"
tę strunę tak, aby zużyta na ten cel została jaknajmniejsza ilość
energii, najlepiej byłoby uderzać ją z taką częstotliwością, z jaką
ma drgać.

Zagadnienie to uwypukla się jeszcze bardziej na przykładzie huś-
tawki, którą bez trudu rozkołysać można najlepiej wtedy, gdy poszczeg-
ólne pchnięcia zostaną zgrane z naturalną szybkością jej wahań.

Podobnie rzecz się ma z rezonansem elektrycznym. Wystarczy małe

ania prądu, czy napięcia, przyłożonego do jakiegoś obwodu rezonansowego, ale o częstotliwości, która odpowiada częstotliwości rezonansowej tego obwodu, aby wystąpiły w nim drgania o niejednokrotnie bardzo dużej amplitudzie.

Tak więc za rezonans elektryczny uważać można przekazywanie energii elektrycznej z jednego obwodu do drugiego poprzez drgania o częstotliwości, odpowiadającej częstotliwości rezonansowej drugiego obwodu.

W radiotechnice bardzo często spotykamy się z problemem dostrojenia obwodu rezonansowego do pewnej częstotliwości, aby wykorzystać maksimum przepięć dla otrzymania wahań napięcia o tej samej częstotliwości, ale o znacznie większej amplitudzie, niż amplituda napięcia przyłożonego. Nie ograniczamy się przy tem do jednej częstotliwości, a staramy się o to, aby móc dla różnych częstotliwości zmienić rezonans celem uzyskania przepięć dla częstotliwości dowolnej. Jak wynika z wzoru:

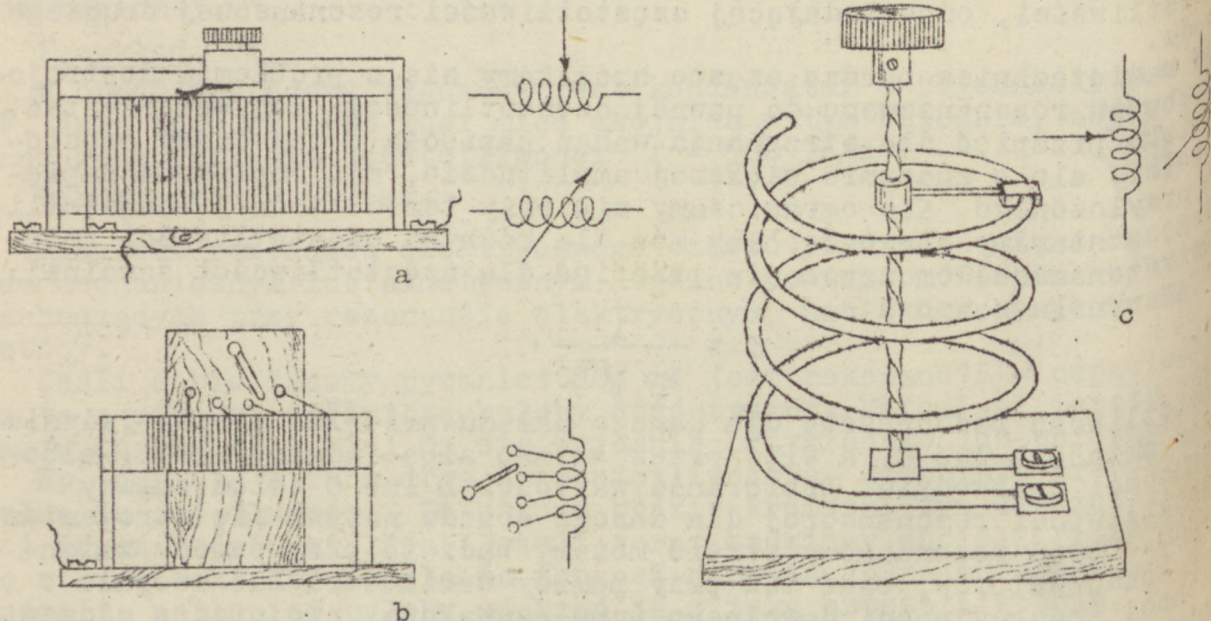
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Częstotliwość rezonansową dla danego układu zmieniać możemy jedynie przez zmianę L lub C, a więc przez zmianę albo indukcyjności, albo pojemności w obwodzie. Dobieranie wartości L lub C celem zmiany częstotliwości rezonansowej dla danego obwodu nazywa się strojeniem obwodu. Obwód rezonansowy stroić możemy bądź to przy pomocy zmiany kondensatorów, bądź też przy pomocy wariometru lub zwojnic o zmiennej indukcyjności dowolnego typu /suwakowa, zwojnica z odczewkami, ze ślizgaczem itp. - rys.184 a, b i c/.

Gdy częstotliwość napięcia przyłożonego odpowiada częstotliwości rezonansowej obwodu, mówimy o obwodzie, że został on dostrojony, że jest zestrojony /do częstotliwości napięcia przyłożonego.

W takim wypadku przez zmianę pojemności lub indukcyjności możemy "odstroić" obwód od rezonansu.

Odstrojenie obwodu od rezonansu mierzyć możemy bądź to w okresach na sekundę czyli cyklach na sekundę, lub w jednostkach pochodnych /kilocyklach na sekundę - kc/s./, bądź też procentowo /w procentach częstotliwości rezonansowej/.



Rys.184. Zwojnice o zmiennej indukcyjności:

- a. Suwakowa,
- b. z odczepami,
- c. ze ślizgaczem.

Przy odstrojeniu obwodu od rezonansu zachodzą w nim zmiany, które obejmują zmiany fazowe, zmianę oporności całkowitej układu i, co tym idzie, zmianę natężenia prądu wypadkowego w obwodzie. Gdy częstotliwość rezonansowa jest mniejsza od częstotliwości napięcia przyłożonego, opór urojony indukcyjności $/X_L/$ wzrasta, a opór urojony pojemności $/X_C/$ maleje. Wskutek tego całkowity opór urojony układu będzie indukcyjny, a zatem prąd wypadkowy w obwodzie będzie opóźniony w stosunku do napięcia przyłożonego. Gdy częstotliwość rezonansowa jest większa od częstotliwości napięcia przyłożonego, zajdą w obwodzie zjawiska odwrotne i urojony wypadkowy obwód będzie pojemnościowy, a co za tym idzie, prąd wypadkowy będzie wyprzedzał napięcie przyłożone. Im bardziej będziemy obwód rezonansowy odstrajali od częstotliwości napięcia przyłożonego, tym oporność całkowita obwodu będzie się zwiększała, ponieważ zwiększać się również będzie różnica oporności wypadkowej - $X_W /$ pomiędzy opornością indukcyjną a opornością pojemnościową w obwodzie $/X_W = X_L - X_C /$. Jak wiemy, zjawisko rezonansu zachodzi w obwodzie rezonansowym dla pewnej stałej wartości iloczynu LC. Możemy użyć w obwodzie większej indukcyjności i mniejszej pojemności, lub też odwrotnie: większej pojemności i mniejszej indukcyjności, mimo to jednak zjawisko rezonansu zajdzie, jeżeli w obu wypadkach wartość iloczynu LC pozostanie bez zmian. Stosunek zatem L/C nie wpływa na natężenie prądu w rezonansie. Gdy jednak odstroimy się od rezonansu, natężenie prądu wypadkowego w obwodzie zmaleje, jeśli stosunek L/C wzrośnie. Opór całkowity układu wynosi bowiem:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}.$$

Gdy zwiększymy stosunek L/C, to, dla danej częstotliwości nierezonansowej, wartość wyrażeń ωL i $1/\omega C$ wzrasta. To też, jeśli indukcyjność w obwodzie zostanie zwiększona p razy $/p > 1/$, to, aby

iloczyn LC pozostał bez zmiany, C musi być mniejsze p razy. Wynika z tego, że zarówno oporność urojona indukcyjności, która w takim wypadku wynosi:

$$X_L = p\omega L,$$

jak i oporność urojona pojemności:

$$X_C = \frac{p}{\omega C},$$

są p razy większe, niż poprzednio. A zatem, przy odstrojeniu się od rezonansu, różnica

$$\omega L - \frac{1}{\omega C}$$

jest p razy większa, niż poprzednio, z czego wynika, że oporność układu nie w wypadku rezonansu wzrasta, a zatem prąd wypadkowy maleje. Krzywa rezonansu znacznie się wtedy zwęża.

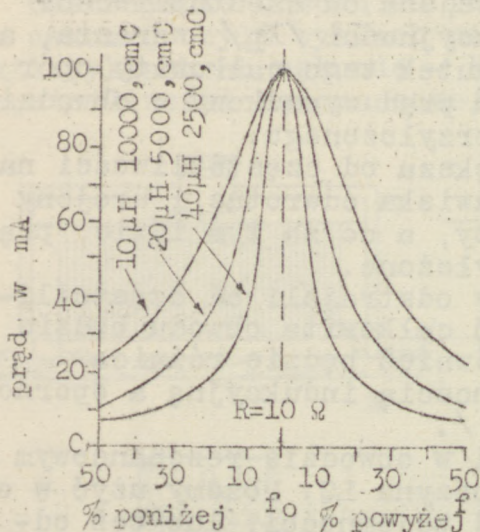
Na rys.185 mamy wykres całego szeregu krzywych rezonansu dla obwodów rezonansowych szeregowych o takiej samej częstotliwości rezonansowej, ale o różnych wartościach stosunku L/C.

Wykres na rys.186 daje nam obraz zmian kształtu krzywej rezonansu w zależności

ności od wartości współczynnika przepięcia:

$$\sigma = \frac{\omega L}{R}.$$

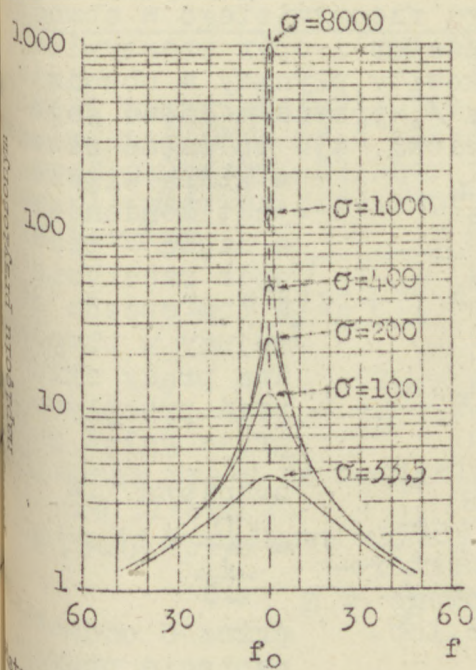
W miarę, gdy częstotliwość napięcia przyłożonego wzrasta, oporność urojona pojemności w obwodzie maleje, a oporność urojona indukcyjności wzrasta. Jeżeli teraz na jednym wykresie /rys. 187/



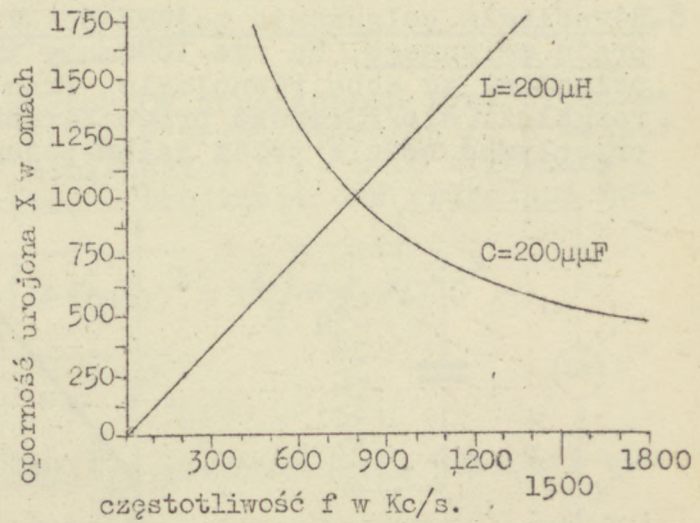
R stałe, L/C zmienne

Rys.185. Krzywe rezonansu dla obwodu rezonansowego szeregowego.

przedstawimy zmianę oporności indukcyjności i pojemności w zależności od częstotliwości napięcia przyłożonego, to zobaczymy, że dla częstotliwości około 800 kc/s. /dla dobranych w danym wypadku wartości L i C, podanych na wykresie/, oporność urojona pojemności



186. Zmiana kształtu krzywej rezonansu w zależności od współczynnika napięcia $\sigma = \omega L/R$.

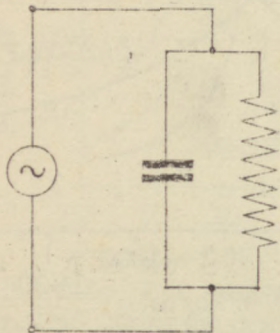


187. Zmiana oporności urojonej indukcyjności i pojemności w zależności od częstotliwości.

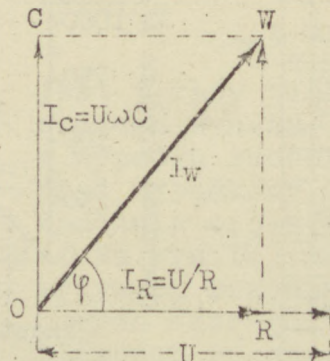
będzie się równała oporności urojonej indukcyjności, czyli, że w obwodzie zajdzie zjawisko rezonansu. Wykres tego rodzaju nazywa się wykresem dynamicznym obwodu rezonan-

sowego. Z wykresu tego bardzo łatwo jest obliczyć oporność wypadkową indukcyjności i pojemności dla każdej częstotliwości napięcia, przyłożonego do obwodu.

8. Równoległe połączenie pojemności i oporu rzeczywistego w obwodzie prądu zmiennego. Na rys. 188 mamy kondensator i opór rzeczywisty, połączone ze sobą równolegle. Prąd całkowity, płynący w obwodzie, rozgałęzi się/pierwsze prawo Kirchhoffa/, przy czym część jego przepływać będzie przez gałąź pojemnościową, tj. tę część obwodu,



Rys. 188. Równoległe połączenie pojemności i oporu rzeczywistego w obwodzie prądu zmiennego.



Rys. 189. Wykres wektorowy prądu wypadkowego w obwodzie z rys. 188.

w którą włączony jest kondensator, a część - przez opór rzeczywisty. W ten sposób otrzymujemy w obwodzie dwa prądy składający prąd przepływający przez gałąź pojemnościową $I_C = \frac{U}{X_C} = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} = U\omega C$, gdzie

przez U oznaczamy napięcie przyłożone i prąd, przepływający przez opór rzeczywisty. Prąd całkowity czyli wypadkowy obliczyć możemy z wykresu wektorowego na rys. 189, uwzględniając, że prąd przepływający przez gałąź pojemnościową, wyprzedza napięcie

łożone o 90° . Na wykresie tym wektor OW obrazuje nam wektor prądu wypadkowego, otrzymanego z wykreślenia przekątnej prostokąta wektorów składowych. Jak widzimy z tego wykresu, odcinek RW ma się odcinkowi OC. Z trójkąta OWR wyznaczyć możemy na mocy twierdzenia Pitagorasa odcinek OW:

$$OW = \sqrt{(OR)^2 + (RW)^2}.$$

Jeżeli uprzytomnimy sobie, że wektor OW oznacza nam prąd wypadkowy I_w , wektor OR - prąd składowy, płynący przez opór I_R , a wektor OW - prąd składowy, płynący przez kondensator I_C , to otrzymany poprzednio wzór na przeciwprostokątną w trójkącie ORW przepisać możemy w formie:

$$I_w = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} = \sqrt{\left(\frac{U}{R}\right)^2 + (U\omega C)^2} = U \sqrt{\frac{1}{R^2} + \omega^2 C^2}.$$

Stąd

$$\frac{I_w}{U} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \omega^2 C^2}.$$

Stosunek prądu do napięcia nazywa się przewodnością układu i oznacza się literą Y.

Oporność wypadkowa układu

$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \omega^2 C^2}}.$$

Mnożąc licznik i mianownik tego wyrażenia przez R, otrzymujemy następującą formę dla obliczeń:

$$Z = \frac{R}{R\sqrt{\frac{1}{R^2} + \omega^2 C^2}} = \frac{R}{\sqrt{1 + \omega^2 C^2 R^2}}$$

Kąt przesunięcia fazowego daje się obliczyć ze stosunku

$$\frac{RW}{GR} = \operatorname{tg} \varphi = \frac{U\omega C}{U} = \omega CR.$$

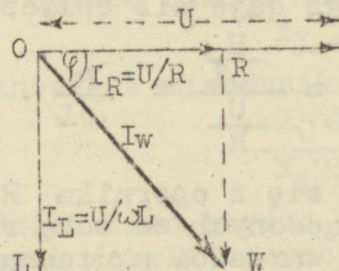
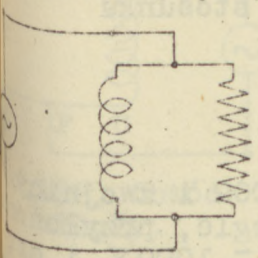
Przykład.

Opornik bezindukcyjny o oporze $R = 10^5 \Omega$ połączony jest równolegle z kondensatorem o pojemności $C = 500 \text{ pF}$. Obliczyć opór, jaki stawia ten układ przepływającemu prądowi zmiennemu o częstotliwości $a/ f = 1 \text{ Mc/s.}$, $b/ 5 \text{ Kc/s.}$, $c/ 100 \sim/\text{sek.}$

Odpowiedź: $a/ 318 \Omega$; $b/ 5,37 \times 10^4 \Omega$; $c/ 10^5 \Omega$.

9. Równoległe połączenie indukcyjności i oporu rzeczywistego w obwodzie prądu zmiennego. Na rys.190 mamy indukcyjność i opór rzeczywisty, połączone ze sobą równoległe. Prąd całkowity, płynący w obwodzie rozgałęzi się, jak i w poprzednim wypadku, przyczym część jego przepływać będzie przez gałąź indukcyjną, a część - przez opór rzeczywisty. Mamy więc i w tym obwodzie dwa prądy składowe: prąd, przepływający przez gałąź indukcyjną $I_L = \frac{U}{X_L} = \frac{U}{\omega L}$, i prąd, przepływający przez opór rzeczywisty $I_R = \frac{U}{R}$. Prąd całkowity możemy obliczyć z wykresu wektorowego, na którym możemy łatwo przedstawić wzajemną zależność obu składowych prądów i prądu wypadkowego. Na rys.191 mamy podany wykres wektorowy, z którego bardzo łatwo obliczyć możemy tak jak i w wypadku kondensatora, włączanego w obwód prądu

lenne równolegle z oporem rzeczywistym, prąd wypadkowy I_w . Jedy-
 różnica pomiędzy wykresem tym a wykresem prądu, płynącego w ob-
 łaie, w którym występuje kondensator, polega na tym, że na wykre-
 e wektor prądu, przepływającego przez indukcyjność, skierowany



jest ku dołowi, ponieważ prąd nie jest przyspieszony, a opóźniony w stosunku do napięcia przyłożonego.

Na mocy twierdzenia Pitagorasa możemy wyznaczyć wartość prądu wypadkowego I_w z trójkąta ORW:

rs.190. Równoległe
 łączenie induk-
 cji i oporu
 rzeczywistego w
 obwodzie prądu
 zmiennego.

Rys.191. Wykres wektorowy prądu wypadkowego w obwodzie z rys.190.

$$I_w = \sqrt{I_R^2 + I_L^2} = \sqrt{\left(\frac{U}{R}\right)^2 + \left(\frac{U}{\omega L}\right)^2} = U \sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{\omega^2 L^2}}$$

Stąd przewodność układu

$$Y = \frac{I_w}{U} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{\omega^2 L^2}}$$

oporność wypadkowa

$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{\omega^2 L^2}}}$$

Mnożąc licznik i mianownik tego wyrażenia przez ωLR , otrzymuje-
 wygodniejszą formę dla obliczeń:

$$Z = \frac{\omega LR}{\omega LR \sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{\omega^2 L^2}}} = \frac{\omega LR}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

Kąt przesunięcia fazowego daje się obliczyć ze stosunku

$$\frac{RW}{OR} = \operatorname{tg} \varphi = \frac{\frac{U}{\omega L}}{\frac{U}{R}}$$

Przykład.

Do obwodu, składającego się z opornika $R = 1500\Omega$ i zwojnicy o indukcyjności $L = 5\text{H}$, połączonych ze sobą równolegle, przyłożone zostało napięcie zmienne o wartości skutecznej $U = 1000\text{V}$. i częstotliwości $50 \sim/\text{sek}$. Obliczyć prąd całkowity, przepływający przez ten obwód.

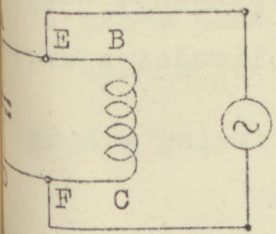
Odpowiedź: 922 mA.

10. Rezonans równoległy czyli rezonans prądów. Jeżeli będziemy mieli obwód, jak na rys.192, to całkowitą oporność urojoną takiego układu obliczyć możemy przez dodanie do siebie obu oporów urojonych indukcyjności i pojemności tak, jakgdyby to były dwa opory rzeczywiste połączone ze sobą równolegle, ale z zastrzeżeniem co do kierunku, tzn., pamiętając o tym, że oporność indukcyjna jest odwrócona o 180° w fazie w stosunku do oporności urojonej pojemności.

Ponieważ zatem opór całkowity dwóch równolegle połączonych ze sobą oporów równa się iloczynowi tych oporów, podzielonemu przez ich sumę, to napisać możemy, że opór całkowity takiego obwodu:

$$Z = \frac{X_C \cdot X_L}{X_L + X_C}$$

nie znak $\hat{+}$ oznacza sumę geometryczną obu tych wartości, tzn. uwzględnieniem znaków czyli kierunku działania obu oporów.



rys. 192. Obwód szeregowy.

Gdy częstotliwość napięcia przyłożonego będzie bardzo duża, to oporność urojona indukcyjności będzie bardzo duża, a oporność urojona pojemności będzie bardzo mała. Wyrażenie zatem

$$X_L \hat{+} X_C,$$

stanowiące mianownik ułamka

$$\frac{X_C \cdot X_L}{X_L \hat{+} X_C}$$

będzie miało bardzo dużą wartość, a zatem cały ułamek /czyli oporność całkowita układu/ będzie

mała wartość bardzo małą.

Gdy częstotliwość napięcia przyłożonego będzie bardzo mała, oporność urojona indukcyjności będzie bardzo mała, ale oporność urojona pojemności będzie bardzo duża. Znowu zatem mianownik wyrażenia

$$\frac{X_C \cdot X_L}{X_L \hat{+} X_C}$$

będzie mały, a, co za tym idzie, oporność całkowita układu będzie bardzo mała. Pomiędzy tymi dwoma granicznymi stanami istnieje stan pośredni, taki, w którym oporność urojona indukcyjności równa się oporności urojonej pojemności:

$$X_L = X_C.$$

Wtedy mianownik wyrażenia

$$\frac{X_L \cdot X_C}{X_L \hat{+} X_C}$$

równać się będzie zeru, ponieważ stanowi on sumę geometryczną obu oporności, czyli, algebraicznie rzecz biorąc, ich różnicę, ponieważ oporność urojona indukcyjności ma znak przeciwny oporności urojonej pojemności.

Bardzo łatwo można obliczyć, dla jakiej częstotliwości zjawisko to zachodzi. Jeżeli bowiem

$$X_L = X_C, \text{ to jest } \omega L = \frac{1}{\omega C},$$

to

$$\omega^2 = \frac{1}{LC}, \text{ skąd } \omega = 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \text{ a zatem}$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Teoretycznie mianownik wyrażenia

$$\frac{X_L \cdot X_C}{X_L \mp X_C}$$

równa się zeru, a zatem cały ułamek /czyli oporność całkowita obwodu/ jest nieskończenie wielki.

Stan taki nazywamy rezonansem obwodu równoległego. W wypadku rezonansu oporność całkowita obwodu równoległego jest największa, czyli prąd, który z prawa Ohma określić możemy wzorem:

$$I = \frac{E}{Z},$$

jest najmniejszy.

Wynika z tego, że napięcie przyłożone jest wtedy największe. W obwodzie równoległym prąd wypadkowy zawsze możemy obliczyć metodą wektorową przez wykreślenie wektora wypadkowego wektorów poszczególnych prądów składowych. W skład prądu wypadkowego wchodzi tutaj tylko dwa prądy: prąd płynący przez gałąź indukcyjną, i prąd, płynący przez gałąź pojemnościową. Możliwe tu są trzy wypadki:

1. Oporność urojona pojemności jest większa od oporności urojonej indukcyjności. Stąd prąd w gałęzi indukcyjnej będzie większy od prądu w gałęzi pojemnościowej.

Z prawa Ohma prąd w gałęzi indukcyjnej:

$$I_L = \frac{E}{X_L} = \frac{E}{\omega L},$$

a prąd w gałęzi pojemnościowej:

$$I_C = \frac{E}{X_C} = \frac{E}{\frac{1}{\omega C}} = E\omega C,$$

przyczym prąd w gałęzi indukcyjnej będzie opóźniony w stosunku do przyłożonego napięcia o 90° , a prąd w gałęzi pojemnościowej będzie wyprzedzał napięcie przyłożone o 90° . Prąd wypadkowy zatem

$$I_W = I_L - I_C = E \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right).$$

Wypadek ten przedstawiony jest na wykresie wektorowym na rys. 193.

2. Oporność urojona indukcyjności jest większa od oporności urojonej pojemności. Stąd prąd w gałęzi pojemnościowej jest większy od prądu w gałęzi indukcyjnej, czyli, jak wynika z wykresu wektorowego na rys. 194, prąd wypadkowy:

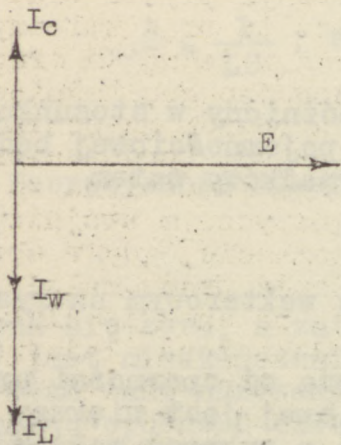
$$I_W = I_C - I_L = E \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right).$$

3. Oporność urojona indukcyjności równa się oporności urojonej pojemności, co zachodzi dla częstotliwości rezonansowej:

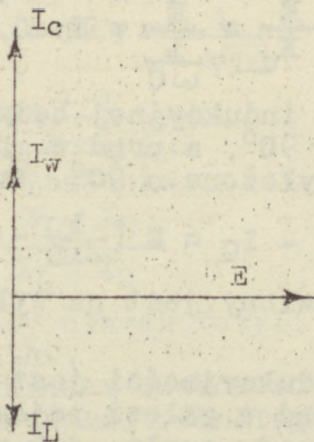
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Stan ten przedstawiony jest wykresem wektorowym na rys.195. Jak to już zostało poprzednio omówione, w takim wypadku oporność całkowita obwodu jest nieskończenie wielka, a prąd wypadkowy równa się teoretycznie zeru.

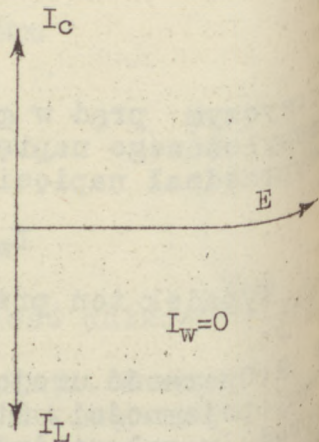
Ponieważ w obwodzie równoległym część wewnętrzna obwodu /punkty A, B, C i D na rys.192/ stanowi jakgdyby obwód szeregowy, w którym dla częstotliwości rezonansowej, jak wiemy, oporności urojone



Rys.193. Wykres wektorowy dla obwodu równoległego, w którym oporność urojona indukcyjności jest mniejsza od oporności urojonej pojemności.



Rys.194. Wykres wektorowy dla obwodu równoległego, w którym oporność urojona indukcyjności jest większa od oporności urojonej pojemności.



Rys.195. Wykres wektorowy dla obwodu równoległego, w którym oporność urojona indukcyjności równa się oporności urojonej pojemności.

kondukcji i pojemności wzajemnie się znoszą, w obwodzie tym, pod wpływem bardzo dużego napięcia przyłożonego /o częstotliwości rezonansowej/, które pomiędzy punktami E i F jest dla tej częstotliwości największe, popłynie bardzo duży prąd, znacznie zwykle większy od prądu całkowitego, płynącego w obwodzie zewnętrznym, tzn. między punktami E i F. Zjawisko to nazywamy przetężeniem.

Na ogół trudno jest zrozumieć, skąd bierze się tak duży prąd w obwodzie wewnętrznym, skoro w obwodzie zewnętrznym płynie prąd bardzo mały. Nie należy jednak zapominać, że jest to prąd zmienny, tzn., że w obwodzie wewnętrznym ładunki płyną raz w jedną, a drugi raz w drugą stronę, ładując kondensator, rozładowując go, ładując odwrotnie /tj. ze znakami odwróconymi /, na powrót go rozładowując itd. Gdy w obwodzie tym płynie prąd największy, kondensator jest całkowicie rozładowany, a energia elektryczna zamieniona została na energię magnetyczną, zawartą w polu magnetycznym zwojnicy. Pole magnetyczne ma największe natężenie w momencie, gdy w obwodzie płynie największy prąd. W miarę, gdy natężenie prądu maleje, energia magnetyczna zostaje stopniowo zamieniona na energię elektryczną, która powstaje w polu elektrycznym kondensatora, ładując się stopniowo w miarę malenia płynącego prądu. Kondensator nalać się do maximum w momencie, gdy prąd równa się zeru. W ten sposób ładunki płyną raz w jednym, a raz w drugim kierunku przez obwód wewnętrzny, w związku z zamianą energii magnetycznej na elektryczną i na odwrót. Możliwe to jest tylko wtedy, gdy w obwodzie nie ma żadnej oporności rzeczywistej, na której energia elektryczna zamienia się w formie wytworzonego ciepła. W praktyce zawsze pewne elementy tego rodzaju występują chociażby oporowi rzeczywistego drutu, z którego zwojnica jest zrobiona. W takim wypadku prąd w obwodzie zewnętrznym /płynący pomiędzy punktami E i F na rys.192/ nie równa się zeru; wartość jego określona jest wielkością strat na oporach rzeczywistych, występujących w obwodzie.

Tak samo, jak w wypadku obwodu szeregowego, tak i obwód równoległy możemy dostroić do częstotliwości rezonansowej przez zmianę bądź to indukcyjności, bądź też pojemności w obwodzie. W identyczny również sposób można obwód równoległy odstraajać od częstotliwości rezonansowej. Odstrojenie takiego obwodu od częstotliwości rezonansowej pociąga za sobą szereg skutków, obejmujących zmiany fazowe, zmianę oporności całkowitej układu i, co za tym idzie, zmianę natężenia prądu wypadkowego w obwodzie.

Przy odstrojeniu się od rezonansu kąt przesunięcia fazowego nie równa się zeru, jak w wypadku rezonansu. Gdy częstotliwość przyłożona jest większa od częstotliwości rezonansowej obwodu, wartość wyrażenia ωC wzrasta, a wartość wyrażenia $1/\omega L$ maleje. A zatem prąd wypadkowy

$$I_w = E \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right)$$

jest pojemnościowy i wyprzedza napięcie przyłożone o 90° .

Gdy częstotliwość przyłożona jest mniejsza od częstotliwości rezonansowej obwodu; wartość wyrażenia $1/\omega L$ wzrasta, a wartość wyrażenia ωC maleje. A zatem prąd wypadkowy:

$$I_w = E \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right)$$

jest indukcyjny i jest opóźniony w stosunku do napięcia przyłożonego o 90° .

Widzimy stąd, że zachodzą tu zjawiska odwrotne, niż w obwodzie szeregowym.

Im bardziej będziemy odstraiali obwód równoległy od częstotliwości rezonansowej, tym bardziej wzrastać będzie różnica

$$\frac{1}{\omega L} - \omega C.$$

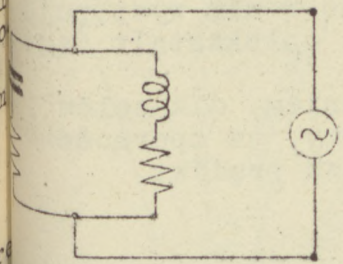
Co za tym idzie, prąd wypadkowy:

$$I_w = E \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right)$$

nie stale wzrastał. To zjawisko jest więc również odwrotne, niż w obwodzie szeregowym.

W wypadku rezonansu, którego warunkiem jest, aby $\omega^2 = \frac{1}{LC}$,

dana wartości stosunku C/L nie wpływa na wielkość prądu. W miarę jednak zwiększania się tego stosunku, prąd wypadkowy w obwodzie dla częstotliwości nierezonansowych znacznie wzrasta. Zwiększenie bowiem pojemności p razy pociąga za sobą konieczność zmniejszenia indukcyjności p razy dla utrzymania stałości iloczynu LC. Co za tym idzie, różnica



$$\omega C - \frac{1}{\omega L}$$

wzrasta p razy, a więc i prąd wypadkowy:

$$I_w = E \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right)$$

196. Opory rzeczywiste w obwodzie równoległym.

wzrasta również p razy. Ten wynik pokrywa się całkowicie z wynikiem, otrzymanym dla obwodu szeregowego.

Jeżeli odstrojenie od rezonansu jest bardzo duże, to obwód równoległy zachowuje się tak, jak gdyby to była sama indukcyjność albo sama pojemność, ponieważ oporność urojona albo pojemności, albo indukcyjności tak znacznie wzrasta, że prawie całkowity prąd płynie przez pozostałą gałąź obwodu.

Przykład.

Przez obwód, składający się ze zwojnicy o indukcyjności $L = \frac{1}{\pi}$ mH i kondensatora o pojemności $0.1 / \mu\mu F$, połączonych ze sobą równolegle,

przepływa prąd zmienny o częstotliwości $f = 100 \text{ kc/s}$. Wiedząc, że napięcie przyłożone, b/ prąd w gałęzi pojemnościowej, c/ prąd całkowity/wypadkowy/.

Odpowiedź: 200 V.; 4 A.; 3 A.

Nie poruszaliśmy dotychczas sprawy oporów rzeczywistych w obwodzie równoległym, mimo że w praktyce zawsze one w nim występują /rys.196/, ponieważ niezmiernie komplikują one całokształt zagadnienia.

Wystarczy powiedzieć, że z pewnym przybliżeniem, dla celów praktycznych zupełnie wystarczającym, przyjąć możemy, że oporność całkowita takiego układu wynosi w wypadku rezonansu prądów:

$$Z = \frac{L}{CR} .$$

Zarówno w wypadku rezonansu, jak i w wypadku odstrojenia się od rezonansu obwód taki zachowuje się zupełnie tak samo, jak obwód rezonansowy równoległy bez oporów rzeczywistych.

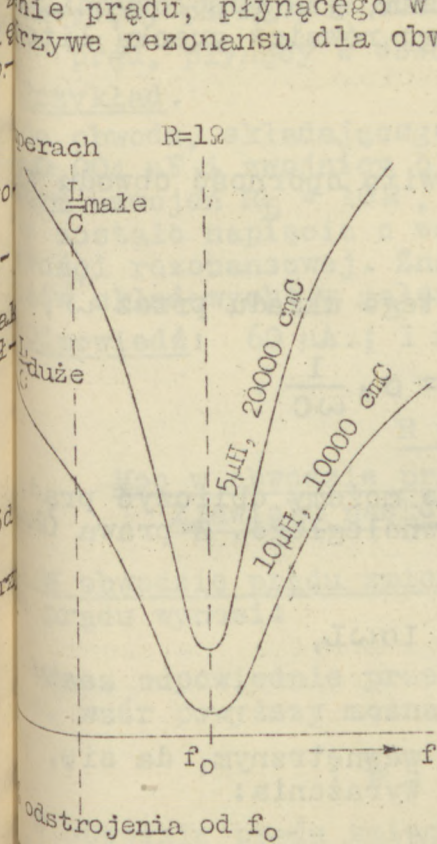
W wypadku jednak zwiększania stosunku C/L przy jednoczesnym utrzymaniu stałości iloczynu LC , zmienia się nie tylko natężenie prądu przy odstrajaniu się rezonansu, ale i prąd wypadkowy, płynący w obwodzie zewnętrznym w wypadku rezonansu. Wiemy bowiem z prawa Ohma, że

$$I = \frac{E}{Z} .$$

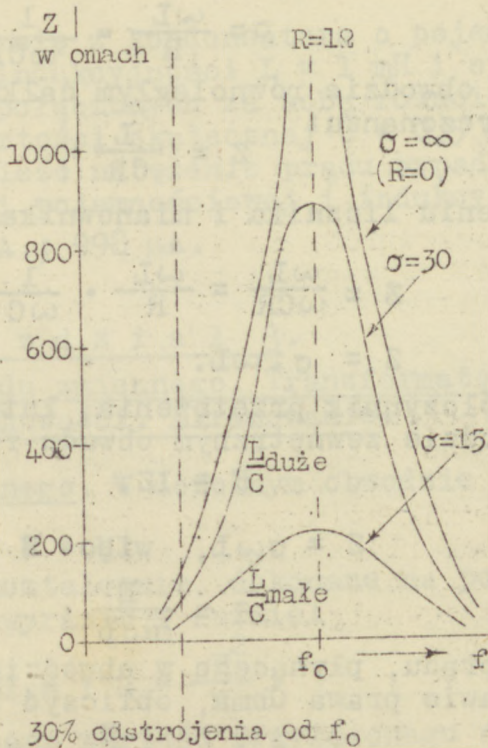
Stąd w obwodzie rezonansowym równoległym, w którym występują opory rzeczywiste,

$$I = \frac{E}{\frac{L}{CR}} = \frac{ECR}{L} .$$

Widzimy więc, że zwiększenie stosunku C/L zwiększy również natężenie prądu, płynącego w obwodzie w wypadku rezonansu.



Rys. 197. Krzywa rezonansu prądu w obwodzie równoległym.



Rys. 198. Krzywa zmiany oporności całkowitej Z dla obwodu równoległego.

na wykresach na rys. 197 i 198. Widzimy, że kształt krzywych rezonansu dla obwodu szeregowego, a różnią się one tylko tym, że są względem siebie odwrócone.

W obwodzie równoległym kształt krzywej rezonansu zależy nie tylko od stosunku C/L , ale i od współczynnika przetężenia, tak jak w obwodzie szeregowym kształt krzywej rezonansu

zależał również i od współczynnika przebiecia. Współczynnik przebiecia w obwodzie równoległym jest taki sam, jak współczynnik przebiecia w obwodzie szeregowym. Oznaczamy go również grecką literą σ i wartość jego obliczamy z wyrażenia:

$$\sigma = \frac{\omega L}{R} = \frac{1}{\omega CR}$$

Ponieważ w obwodzie równoległym całkowita oporność obwodu wynosi w wypadku rezonansu:

$$Z = \frac{L}{CR}$$

to, po pomnożeniu licznika i mianownika tego układu przez ω , otrzymujemy:

$$Z = \frac{\omega L}{\omega CR} = \frac{\omega L}{R} \cdot \frac{1}{\omega C} = \sigma \cdot \frac{1}{\omega C}$$

Podobnie:

$$Z = \sigma \cdot \omega L$$

Znając współczynnik przeteżenia, łatwo możemy obliczyć prąd, płynący w obwodzie zewnętrznym obwodu równoległego. Z prawa Ohma:

$$E = IZ$$

Ponieważ

$$Z = \sigma \omega L, \text{ więc } E = I \sigma \omega L,$$

skąd

$$I = \frac{E}{\sigma \omega L}$$

Natężenie prądu, płynącego w obwodzie wewnętrznym, da się, również na podstawie prawa Ohma, obliczyć z wyrażenia:

$$I_L = I_C = \frac{E}{\omega L} = E \omega C$$

Stąd więc

$$I = \frac{\text{prąd, płynący w obwodzie wewnętrznym}}{\sigma}$$

Mając dany prąd, płynący w obwodzie zewnętrznym, obliczyć możemy natem prąd, płynący w obwodzie wewnętrznym, ponieważ:

prąd, płynący w obwodzie wewnętrznym = σI .

Przykład.

Do obwodu, składającego się z kondensatora o pojemności $C = 0,004 \mu F$ i zwojnicy o indukcyjności $L = 1 \text{ mH}$ i oporze rzeczywistym uzwojeń $R_L = 30 \Omega$, połączonych ze sobą równolegle, przyłożone zostało napięcie o wartości skutecznej $U = 0,5 \text{ V}$. i o częstotliwości rezonansowej. Znaleźć natężenie prądu wypadkowego oraz prądów składowych: w gałęzi pojemnościowej i indukcyjnej.

Odpowiedź: $60 \mu A$.; 1 mA .; $998 \mu A$.

R o z d z i a ł 3.

Moc w obwodzie prądu zmiennego. Transformatory.

Zjawisko naskórkowości. Ekranowanie.

Moc w obwodzie prądu zmiennego. W dowolnym obwodzie prądu stałego moc prądu wynosi:

$$P = UI.$$

Przez odpowiednie przekształcenie, dokonane na podstawie prawa Ohma, wzór powyższy można wyrazić w formie:

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

W obwodzie prądu zmiennego wartość przyłożonego napięcia i wartość prądu, przezeń przepływającego, zmienia się z chwili na chwilę. Poza tym na ogół rzadko napięcie przyłożone i prąd wypadkowy są ze sobą w fazie. Wynika z tego, że moc w obwodzie prądu zmiennego

ma również zmienną wartość, to też można tylko mówić o obliczeniu średniej wartości mocy w ciągu jednego okresu.

Wzajemna zależność napięcia przyłożonego i prądu wypadkowego wynika z rodzaju elementów, wchodzących w skład danego obwodu prądu zmiennego.

Gdy w obwodzie prądu zmiennego występuje tylko jakiś opór rzeczywisty, to, jak już wiemy z poprzednich rozważań, średnia wartość mocy w ciągu jednego okresu wynosi:

$$P = \frac{U_R^2}{2},$$

co odpowiada

$$P = I^2 R,$$

gdzie I oznacza wartość skuteczną prądu zmiennego.

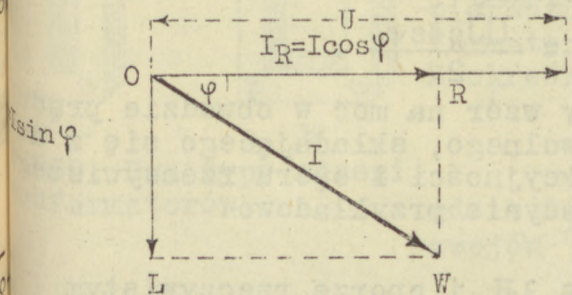
W obwodzie prądu zmiennego, w którym występuje tylko opór rzeczywisty, moc obliczyć możemy przez pomnożenie przez siebie wartości skutecznej napięcia, przyłożonego do obwodu, i wartości skutecznej prądu wypadkowego. Problem ten zwykle nie przedstawia sobą żadnych trudności, ponieważ przyrządy pomiarowe na prąd zmienny dają nam na skali odczyt wartości skutecznych czy to prądu, czy też napięcia.

W wypadku, gdy poza oporem rzeczywistym występują w obwodzie jakieś opory urojone, to uwzględnić już wtedy musimy przesunięcia fazowe i napięcia składowe lub prądy składowe.

Przypuśćmy, że mamy obwód, w który poza oporem rzeczywistym włączona jest równolegle jakaś indukcyjność /rys.190/.

Wiemy, że na prąd wypadkowy w tym obwodzie I składają się dwa prądy: jeden, przepływający przez gałąź indukcyjną I_L , a drugi - przez opór rzeczywisty I_R . Ten stan rzeczy da się zobrazować wykresem wektorowym, jak na rys.199.

Wiemy również, że prąd wypadkowy w tym obwodzie, w skład którego wchodzi indukcyjność, będzie opóźniony w stosunku do napięcia przyłożonego czyli przesunięty w fazie o jakiś kąt φ . Składowy prąd, przepływający przez indukcyjność, wchodzącą w skład obwodu, opóźniony jest w stosunku do napięcia przyłożonego o 90° .



Rys.199. Wykres wektorowy dla obwodu z rys.190.

Składowa ta nazywa się składową bezwatuwą lub bezmocną prądu wypadkowego, ponieważ na ogół, gdy prąd wypadkowy w obwodzie różni się w fazie od przyłożonego napięcia o 90° , moc tego prądu w obwodzie równa się zero. Podczas jednego ówieróokresu energia elektryczna zostaje bowiem zamieniona na energię magnetyczną, zawartą w polu magnetycznym, powstałym wokół zwojnicy. Podczas następnego ówieróokresu energia

elektryczna tego pola zostaje zwrócona obwodowi w formie energii magnetycznej prądu samoindukcyjnego. Stąd więc wynika, że całkowita energia elektryczna, zużyta w obwodzie w ciągu jednego pełnego ok-
rętu, równa się zero, a zatem i moc prądu również równa się zero.

Zatem prąd, przepływający przez opór rzeczywisty, prąd, który jest w fazie z napięciem przyłożonym, pociąga za sobą zamianę ener-
gii elektrycznej na cieplną, a co za tym idzie, pewną stratę mocy, ponieważ energia ta nie zostaje zwrócona już obwodowi.

Aby zatem obliczyć moc w obwodzie prądu zmiennego, należy prąd, przepływający przez opór rzeczywisty, pomnożyć przez napięcie, przyłożone do obwodu.

Z trójkąta OWR na rys.199 prąd, przepływający przez opór rzeczy-
wisty, wynosi:

$$I_R = I \cos \varphi ,$$

gdzie φ jest kątem przesunięcia fazowego WOR.

A zatem moc w obwodzie prądu zmiennego:

$$P = UI \cos \varphi .$$

Zastępując wartości skuteczne napięcia przyłożonego i prądu wypadkowego przez ich amplitudy, otrzymamy:

$$P = UI \cos \varphi = \frac{U}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I}{\sqrt{2}} \cdot \cos \varphi = \frac{UI \cos \varphi}{2} .$$

Powyższe rozumowanie i otrzymany wzór na moc w obwodzie prądu zmiennego są słuszne dla obwodu dowolnego, składającego się z dowolnych elementów, a nie tylko z indukcyjności i oporu rzeczywistego. Powyższy przypadek został podany jedynie przykładowo.

Przykład.

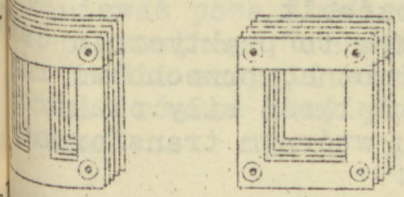
Do zwojnicy o indukcyjności $L = 3\text{H}$ i oporze rzeczywistym $R = 500\ \Omega$ przyłożone zostało napięcie o częstotliwości $f = 50\ \text{Hz}$.
Obliczyć $\cos \varphi$.

Odpowiedź. 0,47.

2. Transformatory. Gdy omawialiśmy przetwornice, wymieniliśmy przetwornice, służące do zamiany napięcia stałego na napięcie zmienne, napięcia zmiennego na napięcie stałe i napięcia stałego również na stałe, ale większe od napięcia przyłożonego, nie wspomnieliśmy natomiast o zamianie napięcia zmiennego na napięcie zmienne większe. Do tego bowiem celu służą nie przetwornice, a urządzenia, zwane transformatorami.

Transformator zwykle składa się z rdzenia, stanowiącego zamknięty obwód magnetyczny o kształcie, pokazanym na rys. 200 a i b. Na rdzeń ten nawięte są dwa uzwojenia, mające cztery wolne końce, wychodzące na zewnątrz. Oba końce jednego uzwojenia łączy się bezpośrednio ze źródłem siły elektromotorycznej zmiennej. Uzwojenie to

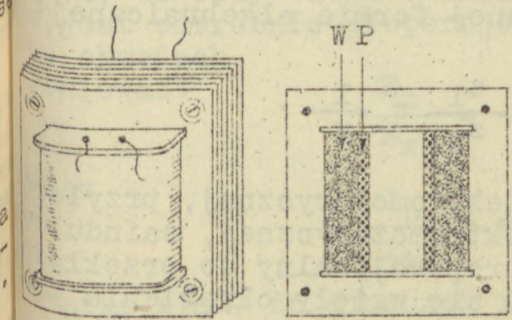
Wytwarza się uzwojeniem pierwotnym. Do obu końców drugiego uzwojenia podłącza się zazwyczaj odbiornik energii elektrycznej. Uzwojenie to nazywa się uzwojeniem wtórnym /rys.201 a, b i c/. Stosunek ilości zwojów w uzwojeniu wtórnym do ilości zwojów w uzwojeniu pierwotnym nazywa się przekładnią transformatora. Przekładnię oznaczamy literą N. Z określenia wynika, że



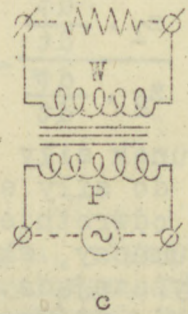
a
b
rys. 200. Dwa typy rdzeni transformatorów.

$$N = \frac{z_2}{z_1}$$

gdzie z_1 i z_2 oznaczają odpowiednio ilość zwojów w uzwojeniu pierwotnym i ilość zwojów w uzwojeniu wtórnym. Jeżeli przekładnia transformatora jest



a
b
c
rys. 201. Transformator. a/ Wygląd zewnętrzny. b/ Przekrój. c/ Oznaczenie schemat.



liczbą większą od jedności, powiadamy, że jest ona podwyższająca. Jeżeli natomiast przekładnia transformatora stanowi ułamek właściwy, nazywamy ją obniżającą. Czasami, szczególnie w teletechnice, spotyka się transformatory, w których przekładnia $N = 1$. Celem uniknięcia strat energii elektrycznej w transformatorze,

Wzwojenie pierwotne. W-uzwojenie wtórne.

rdzeń transformatora wykonany jest zwykle z cienkich blaszek żelaznych, aby, wskutek zmian strumienia magnetycznego, nie zaindukował się w nim prądy wirowe, czyli tzw. prądy Foucault.

Jeżeli transformator jest dobrze wykonany, to praktycznie cały strumień, przechodzący przez uzwojenia pierwotne, przechodzi również i przez uzwojenia wtórne, a ponieważ wielkość siły elektromotorycznej, która się zaindukuje w uzwojeniu wtórnym transformatora, zależy od szybkości zmian strumieniozwojów:

$$E = - \frac{d\phi}{dt} \cdot z,$$

siła elektromotoryczna, zaindukowana w uzwojeniu pierwotnym, będzie tyle razy większa lub mniejsza, ile razy w uzwojeniu wtórnym będziemy mieli większą lub mniejszą ilość zwojów, niż w uzwojeniu pierwotnym. To samo napisać możemy w skróconej formie algebraicznej:

$$\frac{E_p}{E_w} = \frac{z_1 \cdot \frac{d\phi}{dt}}{z_2 \cdot \frac{d\phi}{dt}} = \frac{z_1}{z_2} = \frac{1}{N}.$$

Jak więc widzimy, stosunek siły elektromotorycznej, przyłożonej do uzwojenia pierwotnego, do siły elektromotorycznej, zaindukowanej w uzwojeniu wtórnym, jest odwrotnie proporcjonalny do przekładni transformatora. To nam tłumaczy, skąd się wzięły określenia przekładnia obniżająca i podwyższająca.

Jeśli do końców uzwojenia wtórnego transformatora załączymy jakiś odbiornik energii elektrycznej, zamykając w ten sposób obwód wtórny, to popłynie w nim prąd indukcyjny, którego natężenie możemy na podstawie następującego rozumowania:

Gdy transformator jest dobrze wykonany, niema w nim żadnych

rat mocy, która, jak wiemy, wynosi:

$$P = EI.$$

Ponieważ poza źródłem siły elektromotorycznej, włączonym do obrotu pierwotnego transformatora, nie występują w tym układzie żadne inne źródła energii elektrycznej, moc prądu w obwodzie pierwotnym musi się równać mocy prądu w obwodzie wtórnym /pominąwszy strat/.
Zatem:

$$P = E_p I_p = E_w I_w.$$

Stąd:

$$\frac{E_p}{E_w} = \frac{I_w}{I_p}.$$

Stosunek więc siły elektromotorycznej, zaindukowanej w obwodzie wtórnym, do siły elektromotorycznej, przyłożonej do obrotu pierwotnego, jest odwrotnie proporcjonalny do stosunku prądów, płynących w obu obwodach.

Ponieważ:

$$\frac{E_p}{E_w} = \frac{1}{N},$$

więc

$$\frac{I_p}{I_w} = N.$$

Wynika stąd, że stosunek prądu, płynącego w obwodzie pierwotnym transformatora, do prądu indukcyjnego, płynącego w jego obwodzie wtórnym, jest wprost proporcjonalny do przekładni.

Natężenie prądów, płynących w obwodzie wtórnym i pierwotnym transformatora, ograniczone jest wielkością oporów czy to urojonych, czy też rzeczywistych, występujących w obu tych obwodach. Z prawa Ohma dla prądów zmiennych wiemy, że

$$Z = \frac{E}{I}.$$

A zatem opór całkowity obwodu pierwotnego wynosi:

$$Z_p = \frac{E_p}{I_p}.$$

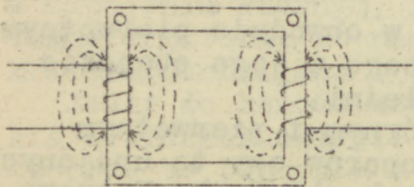
Odpowiednio opór całkowity obwodu wtórnego wynosi:

$$Z_w = \frac{E_w}{I_w}.$$

Z tych danych obliczyć możemy zależność stosunku oporu całkowitego obwodu wtórnego transformatora do oporu całkowitego jego obwodu pierwotnego - od jego przekładni:

$$\frac{Z_w}{Z_p} = \frac{\frac{E_w}{I_w}}{\frac{E_p}{I_p}} = \frac{E_w \cdot I_p}{E_p \cdot I_w} = N^2.$$

Z tego wynika, że opory z obwodu pierwotnego transformatora do jego obwodu wtórnego przenoszą się nie tak, jak siła elektromotoryczna lub prąd, odwrotnie lub wprost proporcjonalnie do przekładni, a w kwadracie przekładni.



Rys. 202. Rozproszenie strumienia magnetycznego w transformatorze.

W praktyce niema transformatorów, w którychby nie było pewnych strat mocy, na składają się: rozproszenie magnetyczne /rozproszanie strumienia magnetycznego-rys 202/, straty na oporze rzeczywistym drutu miedzianego, z którego nawinięte są oba uzwojenia, straty na prądy wirowe, mimo tego że rdzenie transformatorów zrobione są z blaszek żelaznych, odizolowanych od siebie

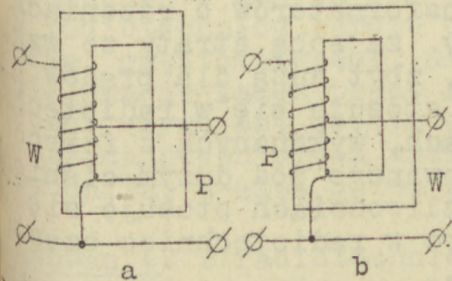
straty na histerezę magnetyczną, która pociąga za sobą zamianę energii elektrycznej na ciepłą, powodując czasami nawet przegrzanie się transformatora.

Przykład.

Uzwojenie pierwotne transformatora ma 400 zwojów, a wtórne - 6000. Obliczyć SEM, indukującą się w jego wtórnym uzwojeniu oraz prąd, przez nie przepływający, wiedząc, że pod wpływem przyłożonego do uzwojenia pierwotnego napięcia $U = 50V$. płynie w nim prąd o natężeniu $I = 30A$. Założywszy następnie, że do końców uzwojenia wtórnego włączony został opornik o oporze $R = 9000\Omega$, obliczyć spór, jaki zostanie "przeniesiony" do uzwojenia pierwotnego.

Odpowiedź. 750V; ; 2A.; ; 42 Ω .

Specjalnym rodzajem transformatora jest tzw. autotransformator rys.203 a i b. W transformatorze tego typu część uzwojenia wtórnego może być użyta jako uzwojenie pierwotne i wtedy transformator taki ma



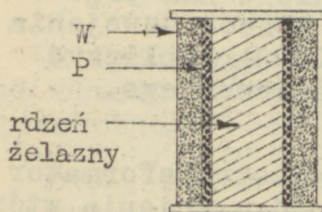
rys.203. Autotransformator przekładni:

- a/ podwyższającej,
- b/ obniżającej.

przekładnię podwyższającą, lub też część uzwojeń obwodu pierwotnego może być użyta jako uzwojenie wtórne i wtedy transformator taki ma przekładnię obniżającą. Wadą tego typu transformatorów jest bezpośrednie połączenie uzwojenia pierwotnego z uzwojeniem wtórnym, ponieważ, gdy nastąpi wypadek przerwania się uzwojenia wtórnego w transformatorze o przekładni obniżającej, do odbiornika przyłożone być może napięcie znacznie większe od dozwolonego. Poza tym część uzwojenia, wchodząca w skład obwodu pierwotnego,

musi mieć dostatecznie duży przekrój ze względu na duże natężenie prądu, płynącego w obwodzie pierwotnym, a całość musi być dobrze zabezpieczona przed przebiciem, ze względu na zwykle dużą siłę elektromotoryczną, indukującą się w części uzwojeń, wchodzącej w skład obwodu wtórnego.

Niezawsze transformator wyposażony jest w rdzeń, stanowiący zamknięty obwód magnetyczny. Tam, gdzie sprawność transformatora nie odgrywa dużej roli i gdzie nie zależy nam na możliwie jak największym uniknięciu rozproszenia magnetycznego, stosuje się transformatory o rdzeniu, jak na rys. 204. Transformatory tego typu nazywa się czasami cewkami indukcyjnymi. Spotyka się je często w urządzeniach, wchodzących w skład instalacji elektrycznej pojazdów mechanicznych.



Rys. 204. Transformator o rdzeniu otwartym.

W radiotechnice mamy do czynienia często z prądami o wielkiej częstotliwości. Użycie w takim wypadku transformatorów o rdzeniach żelaznych pociągnęłoby za sobą straty ze względu na histerezę żelaza, zbyt dużą dla prądów o wielkiej częstotliwości. Z tego względu stosuje się w radiotechnice dla tych prądów transformatory o rdzeniach, wykonanych z ferrocementu, tj. z drobnego proszku żelaznego, sprasowanego pod dużym ciśnieniem z papierem. Przy bardzo wielkich częstotliwościach stosuje się transformatory w ogóle bez rdzenia, które w radiotechnice często opatrzone są mianem obwodów sprzężonych.

3. Zjawisko naskórkowości. W dotychczasowych rozważaniach nie poruszyliśmy zagadnienia zmiany oporu rzeczywistego przewodnika w zależności od częstotliwości prądu przezeń przepływającego, zakładając, że

Ór rzeczywisty przewodnika jest od częstotliwości prądu przezeń przepływającego niezależny. W rzeczywistości jednak płynące ładunki rozkładają się równomiernie na całym przekroju przewodnika, a skupiają się blisko jego powierzchni. Zjawisko to zachodzi ze względu na to, że wokół przewodnika i w samym przewodniku powstaje pod wpływem przepływu prądu zmiennego szereg linii sił pola magnetycznego, które z kolei indukują wewnątrz przewodnika siłę elektromotoryczną. Siła elektromotoryczna jest największa w samym środku przewodnika i rozpycha jak gdyby przepływające przez przewodnik ładunki na zewnątrz. Skutkiem tego większa część prądu płynie bliżej powierzchni przewodnika, niż wewnątrz niego. Im częstotliwość przepływającego prądu jest większa, tym większa siła elektromotoryczna zaindukuje się wewnątrz przewodnika i tym bardziej przepływające ładunki zostaną rozepchnięte na zewnątrz. Co za tym idzie, coraz większa część prądu płynąć będzie bliżej zewnętrznej powierzchni przewodnika.

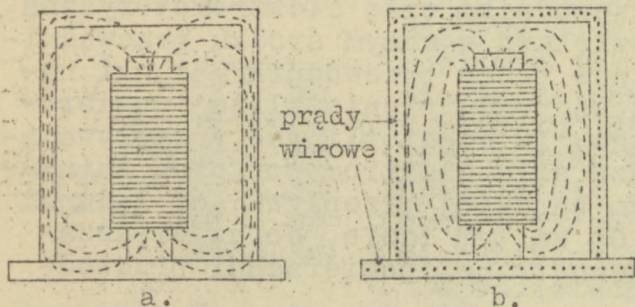
Zjawisko to nazywa się zjawiskiem naskórkowości.

W radiotechnice bardzo często spotykamy się z prądami o bardzo wielkiej częstotliwości. Skutkiem tego, środkiem przewodnika nie płynie prawie żaden prąd. Dlatego też dla prądów o wielkiej częstotliwości używa się często przewodników w kształcie rurek, taśmy składających się z wielu żyłek celem zwiększenia powierzchni przewodnika, a więc celem zmniejszenia jego oporu urojonego.

Ekranowanie. W radiotechnice często trzeba "zaekranować" niektóre części radioaparatu, czyli odseparować je od niepożądanego wpływu czynników zewnętrznych. Chodzi tu po prostu o uniknięcie szkodliwych przezeń pomiędzy poszczególnymi częściami różnych obwodów. Rozróżniamy dwa rodzaje zaekranowania: elektrostatyczne i elektromagnetyczne.

Ekranowanie elektrostatyczne stosuje się w wypadkach, gdy pomiędzy

jakiemiś dwiema częściami obwodów istnieje duża różnica potencjałów. Przez wstawienie pomiędzy obie te części uziemionej płytki metalowej, na której linie sił pola elektrycznego będą się kończyły, uniemożliwić można wzajemnego wpływu na siebie obu tych części. Gdy tego rodzaju płytka nie wystarcza, stosuje się puszki metalowe, którymi się nakrywa wzajemnie na siebie działające zespoły.



Rys.205. Ekranowanie:

- a/ metalem ferromagnetycznym,
b/ metalem magnetycznie obojętnym.

Ważnym jest, aby ekranowanie stawiało on im znacznie mniejszy opór magnetyczny, niż otaczające go zespoły powietrze /rys.205 a/. W obwodach wielkiej częstotliwości zespoły ekranuje się zwykle metalami magnetycznie obojętnymi /miedź, aluminium/. Linie sił pola magnetycznego, przechodząc przez taką puszkę, indukują w jej ściankach prądy wirowe /rys.205 b/, wskutek czego pole magnetyczne na zewnątrz puszki jest bardzo słabe.

Tego rodzaju zaekranowanie stanowi jednak obciążenie dla zespołu ekranowanego, to też jego zaprojektowanie musi być bardzo staranne, aby w zaekranowanym obwodzie nie wystąpiły zbyt duże straty.

Ekranowanie elektromagnetyczne stosuje się w wypadku, gdy wokół pewnych części dwóch różnych obwodów powstają linie sił wzajemnie na siebie działających pól magnetycznych. Chcemy do czynienia z obwodami małej częstotliwości / do 16000 \sim /sek./, do zaekranowania używamy materiałów ferromagnetycznych. Wtedy powstałe linie sił pola magnetycznego zamykają się w tym materiale, ponieważ

C z ę ś ć VIII.

PRYZRZĄDY POMIAROWE.¹⁾

R o z d z i a ł 1.

Pomiary w elektrotechnice i ogólny podział przyrządów pomiarowych.

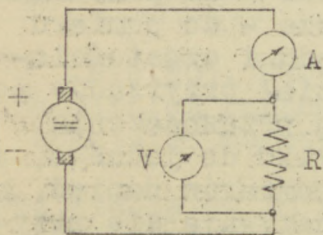
dzaje pomiarów. Najczęściej przeprowadzanymi pomiarami w elektrotechnice są pomiary napięć /ewentualnie spadków napięć/, natężenia prądu, oporności, pojemności, indukcyjności, mocy, pracy prądu i częstotliwości. W związku z tym rozróżniamy następujące ogólne typy przyrządów pomiarowych: woltomierze - służące do pomiaru napięć lub spadków napięć, amperomierze, służące do pomiaru natężenia prądu, rezystancjometry - do pomiarów oporności, mostki pomiarowe - do pomiaru oporności, pojemności lub indukcyjności, watomierze - do pomiaru mocy, liczniki elektryczne - do pomiaru pracy prądu i częstotliwościomierze - do pomiaru częstotliwości. Powyższy podział przyrządów pomiarowych przeprowadzony został ze względu na ich przeznaczenie. Często spotyka się przyrządy, które służą nietylko do jednego, a do wielu różnych pomiarów, jak np. przyrządy do pomiarów napięć, natężenia prądów i oporności. Tego typu przyrządy nazywają się przyrządami wielokrotnymi lub uniwersalnymi.

Z nielicznymi wyjątkami ogólną zasadą działania przyrządów pomiarowych jest przepuszczenie przez nie prądu /całego lub jego części/. Przepływ prądu wywołuje pewne skutki /powstanie ciepła, pola magnetycznego itd./, co w rezultacie daje zamianę energii elektrycznej na mechaniczną, przejawiającą się zwykle w wychyleniu się wskazówki, w jaką prawie każdy przyrząd pomiarowy jest zaopatrzony.

¹⁾ Streszczenie obszerniejszej pracy autora pt. "Elektryczne przyrządy pomiarowe".

Aby dokonać pomiaru natężenia przepływającego przez obwód /lub jego część/ prądu, amperomierz musi być włączony w obwód szeregowy, aby cały prąd, którego natężenie ma być zmierzone, przezeń przepłynął. Pociąga to za sobą konieczność zredukowania do minimum oporności własnej amperomierza, w przeciwnym bowiem razie włączenie amperomierza w obwód spowodowałoby zmianę natężenia przepływającego prądu w obwodzie i w rezultacie otrzymalibyśmy fałszywy odczyt. Wskazywany to wypadków, gdy amperomierz jest włączony w obwód na przykład, jak np. amperomierze tablicowe w elektrowniach, ładowniach akumulatorów itp. instalacjach. Niezależnie od tego duża oporność własna amperomierza powodowałaby straty mocy w obwodzie I^2R .

Aby dokonać pomiaru spadku napięcia, woltomierz należy włączyć pomiędzy dwa punkty obwodu, połączone jakimś opornikiem, a więc równolegle do opornika, na którym ten spadek napięcia występuje. Aby nie zmieniać wartości tego spadku napięcia przez włączenie przyrządu i nie otrzymać fałszywego pomiaru, woltomierz musi mieć możliwie jaknajwiększą oporność. W takim wypadku nieznaczna tylko część prądu przepłynie przezeń, w bardzo małym stopniu zmieniając natężenie prądu, przepływającego w obwodzie. Wynika z tego, że każdy amperomierz zamienić możemy na woltomierz przez szeregowo włączenie tzw. opornika dodatkowego, którego wartość jest z reguły duża, co zmniejszenie strat mocy ($\frac{V^2}{R}$) w obwodzie.



Rys.206.Sposób włączenia amperomierza i woltomierza w obwód.

A - amperomierz,
V - woltomierz.

W wypadku, gdy pomiar ma na celu zmierzenie napięcia, przyrząd włączamy bezpośrednio do zacisków źródła. Aby otrzymać odczyt,

W najbardziej zbliżony do napięcia rzeczywistego w obwodzie, to wypadku, gdy obwód ten nie jest zamknięty, oporność przyrządu powinna równać się oporności samego obwodu. Wtedy natężenie prądu, przepływającego przez przyrząd i przez samo źródło, będzie takie same, jak w wypadku zamknięcia obwodu, wskutek czego spadek napięcia na oporze wewnętrznym źródła będzie niezmienny i na zaciskach przyrządu. Woltomierz o tak dobranej oporności wewnętrznej używa się woltomierzem próbnikowym. Woltomierze próbnikowe lub skrócie próbniki stosuje się często do badania napięć baterii ogniw lub akumulatorów.

Siły elektromotorycznej źródeł zmierzyć w ten sposób idealnie możemy, im większa jest jednak oporność woltomierza, tym mniejsze jest natężenie przepływającego prądu i tym mniejszy spadek napięcia na oporze wewnętrznym źródła. W wypadku więc, gdy oporność woltomierza jest duża, odczyt napięcia na zaciskach źródła może być bardzo zbliżony do wartości właściwej siły elektromotorycznej.

Wynika z tego /o ile nie mamy do czynienia z próbnikami ogniwo/, że woltomierz jest tym lepszy, im jego oporność jest większa, to do dokładnych pomiarów napięć stosuje się woltomierze o możliwie dużej ilości omów, przypadających na każdy wolt zakresu przyrządu. Gdy zatem mamy woltomierz, mierzący nam napięcie do 10 V., a jego oporność wewnętrzna wynosi 5000 Ω , powiadamy, że przyrząd ten

$$\frac{5000 \Omega}{10 V} = 500 \Omega/V.$$

Na rys. 206 mamy pokazany sposób włączenia amperomierza i woltomierza w obwód oraz ich konwencjonalne oznaczenia schematyczne.

Podział przyrządów pomiarowych i ich ogólna charakterystyka. Poprzez ten już przeprowadziliśmy podział przyrządów pomiarowych ze względu

na ich przeznaczenie. Przyrządy podzielić można na grupy jednak i z innych względów, np. biorąc pod uwagę ich zastosowanie - na przyrządy laboratoryjne, tablicowe itp. - lub zakres, czy też budowę. Celowość użycia, zastosowanie, zakres i budowa nie wyczerpują jeszcze wszystkich cech charakterystycznych przyrządu. Dokładne scharakteryzowanie przyrządu pomiarowego pociąga za sobą konieczność omówienia innych jeszcze jego cech, jak czułość, dokładność, zakres działania i układ jego skali. W dalszym ciągu niniejszej pracy przyjęty został za podstawę ogólny podział przyrządów ze względu na ich przeznaczenie, przy jednoczesnym uwzględnieniu dalszego podziału ze względu na ich zasadę działania. Pozostałe cechy przyrządów pomiarowych są omówione w poszczególnych podpunktach i zestawione w reasumującej je tabeli.

R o z d z i a ł 2.

Przyrządy do mierzenia natężenia prądu.

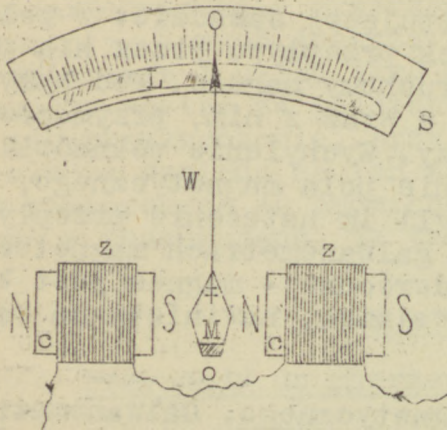
1. Podział ogólny. Przyrządy do mierzenia natężenia prądu nazywają się amperomierzami, o ile ich tarcza, po której posuwa się wskazówka, wyskalowana jest w amperach. Istnieją jednak przyrządy, które wskazują przepływ, a czasami i kierunek przepływającego prądu, przy czym nie mają one za zadanie wykazania jego natężenia a tylko porównanie natężeń różnych prądów, to też skala ich podzielona jest zazwyczaj na stopnie. Przyrządy tego typu używane są często w laboratoriach lub w specjalnych układach /np. w mostku Wheatstone'a / i nazywają się galwanometrami. Budowa amperomierzy podobna jest do budowy galwanometrów; zasadnicza różnica pomiędzy obydwojmi rodzajami tych przyrządów polega na zazwyczaj większej czułości i dokładności galwanometrów oraz na różnicy w wyskalowaniu tarcz

galwanometrów i amperomierzy. Rozważania nasze rozpoczniemy od omówienia galwanometrów.

Zasadnicze typy galwanometrów. Rozróżniamy dwa zasadnicze rodzaje galwanometrów: elektromagnetyczne i magnetoelektryczne. Galwanometry elektromagnetyczne działają na następującej zasadzie: w polu magnetycznym zwojnicy, powstałym wskutek przepływu przez nią prądu, który ma być zmierzony, osadzony jest ruchomy magnes. Pod wpływem pola magnetycznego magnes się wychyla, a wraz z nim, przymocowana doń wskazówka, poruszająca się po tarczy. Wchylenie wskazówki będzie oczywiście tym większe, im natężenie pola magnetycznego, powstałego w zwojnicy, będzie większe, czyli im natężenie przepływającego przez nią prądu będzie większe. W galwanometrach magnetoelektrycznych role zwojnicy i magnesu są odwrócone - magnes jest bowiem nieruchomy, a w jego polu obraca się zwojnica, nawinięta na ramkę, do której przymocowana jest wskazówka.

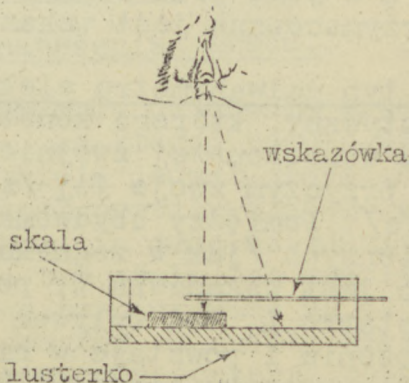
Najprostszy typ galwanometru elektromagnetycznego. Galwanometr elektromagnetyczny, którego konstrukcja pokazana jest na rys. 207, składa się z dwuczłonowej zwojnicy, której oba człony nawinięte są przeciwnie, przyczym zwoje jej /z/ umieszczone są na tekturowych cylindrach /c/. Pomiędzy obydwoma członami umieszczona jest nałożyskach kamiennych /jak w zegarku/ igła magnetyczna M, do której przymocowana jest wskazówka W, poruszająca się po skali S, zaopatrzonej w lustro L. Pod wpływem przepływającego przez zwojnicę prądu o natężeniu I powstaje w niej pole magnetyczne o biegunach, oznaczonych na rysunku literami N i S. To pole magnetyczne, którego natężenie zależy, jak wiemy, od natężenia przepływającego przez zwojnicę prądu, spowoduje większe lub mniejsze wychylenie się igły magnetycznej w prawo lub w lewo, w zależności od kierunku tego prądu.

Igła magnetyczna zaopatrzona jest w ciężarek O, aby po każdym pomiarze mogła wrócić do położenia zerowego /na środku skali/. Dlatego też podczas dokonywania pomiarów położenie przyrządu musi być



Rys. 207. Konstrukcja najprostszego galwanometru elektromagnetycznego.

Rys. 208. Uniknięcie paralaksy przy odczytach.



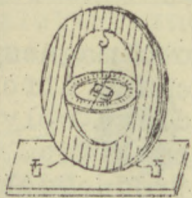
nowe. Lusterko L na skali służy do uniknięcia paralaksy przy pomiarach, tj. błędu oka. Aby dokładnie odczytać wychylenie, oko, wskazówka i odpowiednia działka na skali muszą się znajdować na jednej linii. Zachodzi to w wypadku, gdy wskazówka pokrywa się w naszym oku ze swoim odbiciem w lusterku /rys.208/.

Ponieważ, mimo pionowego położenia przyrządu przy odczytach, na igłę

działa pole magnetyczne ziemskie i ze względu na to, że jej wychylenia są tylko w przybliżeniu proporcjonalne do natężenia prądu, tego

typu galwanometr nie jest bardzo dokładny. Używa się go zwykle do przybliżonych pomiarów w laboratoriach, w niektórych przyrządach złożonych /np. w mostkach Wheatstone'a/ i czasami w pewnych kontrolnych obwodach pocztowych /zwykle telegraficznych/.

Galwanometr tangensowy. Galwanometr tangensowy /rys.209/ składa się z podstawki, na której umieszczona jest forma drewniana z nawiniętą na nią wielozwojową zwojnicą z drutu miedzianego, z tarczy, umieszczonej prostopadle wewnątrz tej formy i z krótkiego magnesu, zawieszzonego na nitce jedwabnej. Do magnesu przymocowana jest prostopadle długa wskazówka, wychylająca się na tarczy, podzielonej na stopnie. Przy dokonywaniu pomiarów galwanometr musi być ustawiony tak, aby płaszczyzna cewki była równoległa do południka magnetycznego ziemskiego. Wtedy magnes przybierze położenie, jak na rysunku. Gdy przez zwojnicę przepuścimy prąd, magnes będzie podlegał wpływom dwóch pól magnetycznych: ziemskiego i pola magnetycznego, powstałego wewnątrz zwojnicy. To pole, powstałe wskutek przepływu prądu przez zwojnicę,

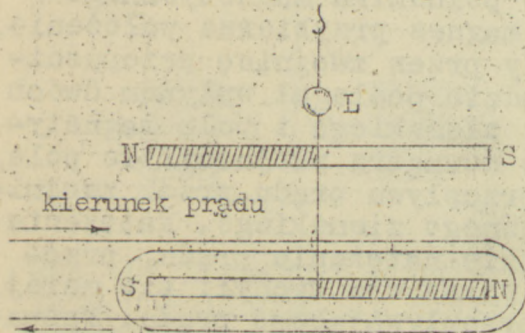


Rys. 209. Galwanometr tangensowy.

będzie prostopadle do pola magnetycznego ziemskiego. Natężenie tego będzie tym większe, im większe będzie natężenie prądu, przepływającego przez zwojnicę. Wobec tego wskazówka wychyli się mniej lub więcej, w zależności od natężenia, przepływającego prądu. Nazwa tego galwanometru pochodzi stąd, że natężenie prądu jest wprost proporcjonalne do tangensa kąta wychylenia wskazówki. Opisany tu przyrząd jest przyrządem typowo laboratoryjnym i stosunkowo dość czułym, gdy jednak chodzi o dużą czułość i dokładność, stosuje się galwanometry specjalne, w których zwiększenie czułości można uzyskać na trojakię drodze: 1/ przez zwiększenie ilości zwojów zwojnicy, co jednak zwiększa opór własny przyrządu, 2/ przez zwiększenie natężenia pola magnetycznego zwojnicy poprzez zmniejszenie jej średnicy lub 3/ przez skasowanie lub co najmniej zmniejszenie wpływu pola magnetycznego ziemskiego.

5. Neutralizacja wpływu pola magnetycznego ziemskiego i dodatkowe sposoby zwiększenia czułości galwanometru. Wpływ pola magnetycznego ziemskiego na wychylenie się strzałki galwanometru zneutralizować można dwoma sposobami: 1/ przez umieszczenie w przyrządzie magnesu dodatkowego, którego pole magnetyczne przeciwdziała polu magnetycznemu ziemskiemu i 2/ przez zastosowanie tzw. "pary astatycznej" magnesów /rys.210/.

"Parę astatyczną" magnesów stanowią dwa jednakowe magnesy, zawieszony tak, że bieguny ich skierowane są w przeciwną stronę, woba-



Rys.210. Para astatyczna magnesów.

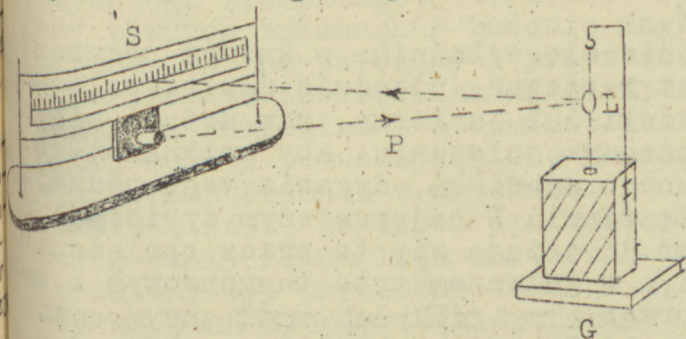
czego całość nie podlega wpływowi pola magnetycznego ziemskiego. Ponieważ jednak bardzo jest trudno dobrać dwa magnesy jednakowe, w galwanometrze astatycznym /z astatyczną parą magnesów/ stosuje się również i magnes dodatkowy, neutralizujący prawie całkowicie wpływ pola magnetycznego ziemskiego. Czułość tego typu przyrządów jest tak duża, że mierzyć możemy przy ich pomocy prądy o natężeniu rzędu 0,01 μ A.

Dodatkowym urządzeniem, uczulającym galwanometr, jest lusterko, zawieszony na tej samej nitce, co i wychylające się magnesy /L na rys.210/. Na lusterko to pada promień świetlny P /rys.211/, który zostaje odbity na skalę S, umieszczoną w odległości do 1 metra od przyrządu. W ten sposób zamiast wskazówki, obciążającej przyrząd, wykorzystany zostaje promień świetlny. Urządzenie to ma dodatkową zaletę, polegającą na tym, że kąt przesunięcia promienia na skali jest dwukrotnie nie większy od kąta wychylenia magnesu.

Mimo tych wszystkich ulepszeń, tego typu galwanometry mają dwie

zasadnicze wady: 1/ podlegają, chociażby tylko w nieznacznym stopniu, wpływowi pola magnetycznego ziemskiego i 2/ wychylenie się wskaźnika przyrządu spowodować może nie tylko prąd, którego natężenie ma być zmierzone, ale i obecność jakiegos obcego pola magnetycznego. Wad tych pozbawiony jest galwanometr magnetoelektryczny.

Galwanometr d'Arsonvala. Najpospolitszym typem galwanometru magnetoelektrycznego jest galwanometr d'Arsonvala /rys.212/. Składa się on ze stałego magnesu pierścieniowego, w którego polu umieszczony jest walec żelazny,



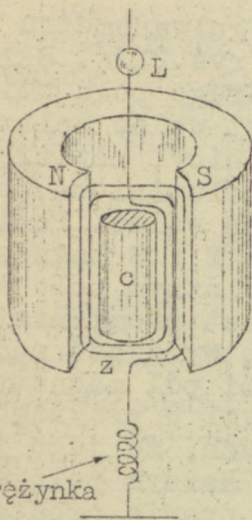
na ramkę aluminiową, obejmującą ten walec. Pomiędzy biegunami N i S magnesu a walcem żelaznym pole magnetyczne jest promieniste; ma ono tę wyższość nad innymi formami pól magnetycznych, stosowanymi w przyrządach pomiarowych, że jego linie sił są w każdym położeniu zwojnicy prawie prostopadłe

Rys.211. Skala świetlna galwanometru.

do walca. Pole to więc uważać można za praktycznie jednorodne, a więc pomiary, dokonane przy pomocy tego przyrządu, są, w przeciwstawieniu do przyrządów poprzednio opisanych, ściśle dla każdego położenia zwojnicy, a nie tylko dla małych wychyleń wskaźnika. Ramka aluminiowa zawieszona jest w tym przyrządzie na druciku fosforo-bronзовym, na którym umieszczone jest lustro. Drucik ten stanowi jednocześnie odprowadzenie od jednego z końców zwojnicy. Drugi jej koniec przymocowany jest do sprężynki, połączonej z zaciskiem na dnie pudełka, w którym cały przyrząd jest zamontowany.

Napięcie tej sprężynki powoduje powrót zwojnicy do jej położenia zerowego po każdym pomiarze.

Wchylenie się zwojnicy zależne jest bezpośrednio od natężenia pola magnetycznego, powstałego w niej wskutek przepuszczenia przez nią prądu, a więc pośrednio zależy ono od natężenia tego prądu.



Zasada działania tego typu przyrządu pomiarowego nie różni się od zasady działania silnika elektrycznego. Odczyt wychylenia tego typu galwanometru otrzymujemy na skali świetlnej /rys.211/.

Wchylenie się wskaźnika w każdym przyrządzie o ile jest raptowne, powoduje długotrwałe drganie wskazówki lub lusterka, nim ustali się ono w swym końcowym położeniu. Aby uniknąć tego niepożądanego zjawiska, drgania tego rodzaju zwykle się tłumi. W najprostszym typie galwanometru /par.3/ osiąga się to przez obciążenie wskazówki, a w galwanometrze tangensowym i astacyjnym przez skręcenie nitki lub przez przymocowanie do niej blaszek aluminiowych, które, obracając się wraz ze wskaźnikiem przyrządu, napotykają na opór powietrza, redukującego szybkość wychylenia wskaźnika przyrządu czyli, innymi słowy, zwiększającego bezwładność galwanometru. Gdy opór powietrza nie wystarcza, można zanurzyć

Rys.212. Galwanometr d'Arsonvala.

blaszki w naczyniu z olejem. W galwanometrze d'Arsonvala zwiększenie bezwładności uzyskuje się przez nawinięcie zwojnicy na ramkę aluminiową, która jest stosunkowo lekka i nie obciąża zbyt mocno wskaźnika przyrządu. Gdy ramka ta obraca się w polu magnetycznym stałego indukcją się w niej prądy wirowe; zjawisko to zachodzi

sztem energii kinetycznej ruchu, a więc i drgań ramki, które zają w ten sposób stłumione.

Galwanometr d'Arsonvala, zbudowany w sposób wyżej opisany, jest dość czułym i dokładnym przyrządem laboratoryjnym. Dokładność jego pochodzi stąd, że nie reaguje on ani na pole magnetyczne ziemskie, ani na żadne inne pole magnetyczne, które może być w jego pobliżu utworzone. Poza tym pomiary dokonywać można w dowolnym położeniu przyrządu - nie musi on być wcale ustawiony równolegle do południka magnetycznego ziemskiego.

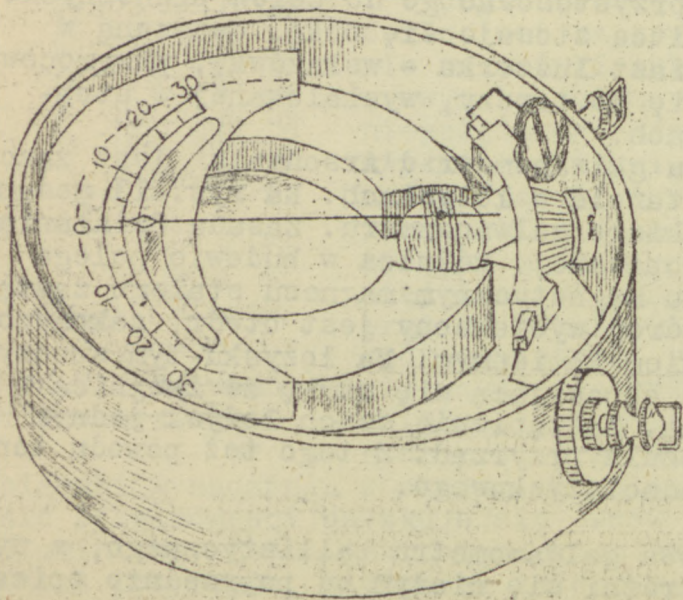
Przy pewnych zmianach w budowie tego przyrządu można zmniejszyć czułość jego na wstrząsy i przystosować go do celów przenośnych. Zamiast zawieszenia na nitce stosuje się ośkę, osadzoną w łożyskach na kamieniach, a zamiast lusterka - wskazówkę, przymocowaną do tej ośki i poruszającą się po tarczy, wyskalowanej w stopniach lub bezpośrednio w amperach.

Oczywiste jest, że tego typu galwanometr d'Arsonvala jest znacznie mniej czuły ze względu na tarcie w łożyskach. Na rys. 213 podany jest uczulony typ przenośny takiego galwanometru. Zasada działania jest identyczna do poprzednio opisanej. Różnica w budowie polega na tym, że walec żelazny w polu magnetycznym magnesu stałego zastąpiony jest kulką żelazną, w której wywiercony jest otwór, zakończony w samym środku kulki łożyskiem kamiennym. Na łożysku tym spoczywa półośka, przechodząca przez obracającą się ramkę ze zwojnicą i popatrzona w speżynkę powrotną. Zastąpienie dwóch łożysk jednym znacznie zmniejsza tarcie i uczula przyrząd. Z tego też powodu ten typ galwanometru nosi nazwę jednołożyskowego.

Galwanometr ballistyczny. Budowa galwanometru ballistycznego, z wyjątkiem dwóch szczegółów, nie różni się niczym od poprzednio opisanego. Celem galwanometru ballistycznego jest bowiem nie pomiar natężenia prądu, a pomiar ładunku elektrycznego czyli ilości przepływa-

jącej elektryczności. Galwanometr ten ma zastosowanie np. w wypadku pomiaru ładunku, odpływającego lub dopływającego do okładek kondensatora itp. Wobec tego bezwładność jego jest duża, ponieważ wychylenie się wskazówki nie powinno nastąpić szybciej, niż całkowity przepływ ładunku, a drgania jej są nietłumione, bo wielkość ładunku oblicza się właśnie z różnicy jej poszczególnych wychyleń.

8. Boczniki. Wielozakresowość galwanometru uzyskuje się przez zastosowanie boczników, których sposób obliczenia podany już został w części I, rozdz. 5, par. 7.



Rys. 213. Galwanometr jednołożyskowy.

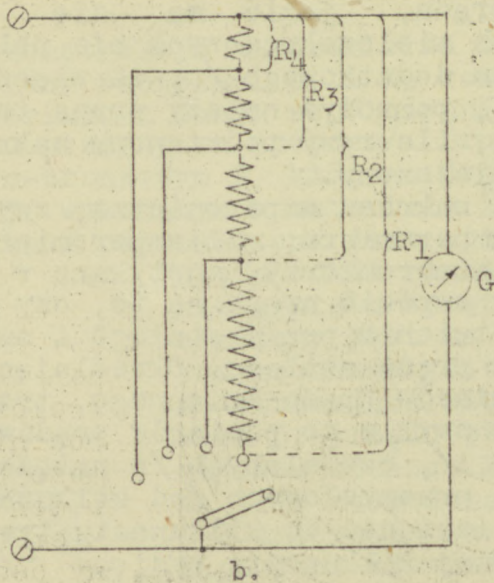
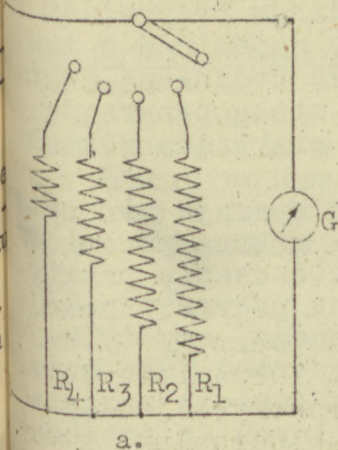
W przyrządach tablicowych boczniki są zwykle zamontowane osobno, a w przyrządach przenośnych - w tym samym pudełku.

Jednym z najpowszechniej używanych boczników w galwanometrach lub amperomierzach wielozakresowych jest tzw. bocznik uniwersalny, który może być skonstruowany albo w ten sposób, że przełącznikiem włącza się w obwód dowolny osobny opornik /rys. 214a/ albo też odpowiednią część lub całość bocznika /rys. 214b/.

Opory bocznikowe wykonane są zwykle z taśmy manganinowej /stop składający się z 84% miedzi, 12% manganu i 4% niklu/, o bardzo małym współczynniku cieplnym oporności.

W ten sposób unika się wpływu temperatury otoczenia na dokładność miaru. Ponieważ jednak zwojnice w przyrządach wykonane są z drutu miedzianego, zmiana temperatury otoczenia może wpłynąć na stosunek

oporności zwojnicy w przyrządzie do oporności bocznika. Dlatego też zwykle przyrządy zaopatrzone są w dodatkowy, mały opornik z manganinu, połączony szeregowo ze zwojnicą. Stosunek oporności zwojnicy do oporności opornika manganinowego jest bardzo mały, to też zmiany temperatury prawie nie wpływają zupełnie na stosunek oporności właści-



rys. 214. Boczniki uniwersalne.

tego układu pomiarowego do oporności bocznika.

amperomierze. Jak już to poprzednio zostało zaznaczone, amperomierze różnią się budową od galwanometrów. Z reguły są one jednak mniej czułe i mniej delikatne, ponieważ przeważnie muszą być przystosowane do celów praktycznych, a nie laboratoryjnych, z czym bezpośrednio wiąże się kwestia ich przenośności, a więc odporności na

wstrząsy mechaniczne itp. Wszystkie poprzednio omówione typy galwanometrów mogą być zamienione na amperomierze, jeśli poza mocniejszą budową przyrządów, tarczę ich zostaną wyskalowane bezpośrednio w amperach, kiloamperach, miliamperach lub mikroamperach, w zależności od natężenia prądu, jakie ma się danym przyrządem zmierzyć. W przyrządach wielozakresowych nie należy zapominać o tym, że gdy używamy zakresu dodatkowego /przez włączenie bocznika/, wynik odczytany na skali, pomnożyć należy przez tzw. stałą przyrządu, tj. liczbę, wskazującą, ile razy podstawowy zakres przyrządu został zwiększony lub zmniejszony.

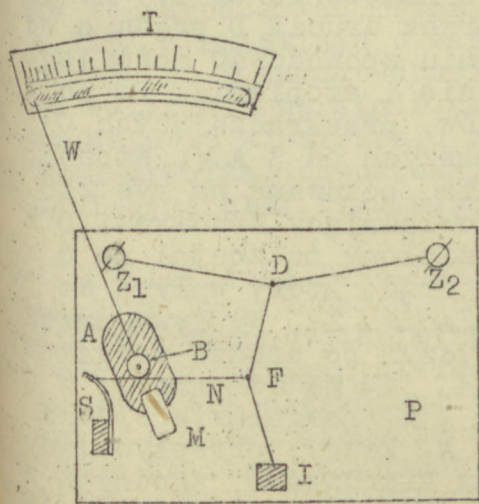
W zależności od zakresu amperomierza, zwykle operuje się nazwaniami amperomierz, kiloamperomierz, miliamperomierz i mikroamperomierz.

Omawiając typy amperomierzy, spotykane w zastosowaniu praktycznym, zawsze należy zwrócić uwagę na to, czy dany przyrząd nadaje się do pomiarów natężenia prądu stałego i zmiennego, czy tylko do pomiarów natężenia prądu stałego. Określając przyrząd jako nadający się również do pomiarów prądu zmiennego, trzeba jeszcze zaznaczyć, czy stosuje się go zwykle do pomiarów prądów silnych /o natężeniu rzędu co najmniej 1 A/, czy słabych /o natężeniu poniżej 1 A/ i czy dla częstotliwości przemysłowych /od kilkunastu do kilkuset \sim /sek./ małych /od kilkadziesiątu do kilkunastu tysięcy \sim /sek./, czy wreszcie wielkich /powyżej kilkunastu tysięcy \sim /sek./.

Powyżej opisane przyrządy nie nadają się do pomiarów natężenia prądów zmiennych, ponieważ bezwładność wskaźnika nie pozwoliłaby na wychylanie się wskaźówki naprzemiennie to w lewo, to w prawo, w takich zmian kierunku przepływającego przez przyrządy prądu. Niemniej jednak przy pewnych urządzeniach dodatkowych, jak termopara lub przetworniki, które są niżej omówione, szczególnie przyrządy magneto-elekttryczne mają szerokie zastosowanie przy pomiarach słabych prądów zmiennych o wielkiej częstotliwości.

Do tego samego celu służą również niżej opisane amperomierze cieplne. Do pomiarów natężeń prądów silnych o częstotliwości przemysłowej stosuje się amperomierze elektromagnetyczne o specjalnej konstrukcji lub elektrodynamiczne. Budowa tych przyrządów jest również niżej omówiona.

Amperomierz cieplny. Konstrukcja amperomierza cieplnego pokazana jest na rys.215. Pomiędzy zaciskami Z_1 i Z_2 rozciągnięty jest drucik D, wykonany z materiału o dużym współczynniku cieplnym oporności /zwykle ze stopu platyny ze srebrem/. Drucik ten napięty jest drucikiem fosforo-bronзовym F, którego drugi koniec zamocowany jest w imadełku I, wykonanym z materiału izolacyjnego. Mniej więcej w środku drucika F odprowadzona jest nitka jedwabna N, owinięta wokół ruchomego bloczka B i naciągnięta sprężynką S. Bloczek B osadzony jest na ośce, do której przymocowana jest aluminiowa płytką A, obracająca się wraz ze wskaźnikiem przyrządu pomiędzy biegunami magnesu stałego M. Całość zmontowana jest na podstawie P.

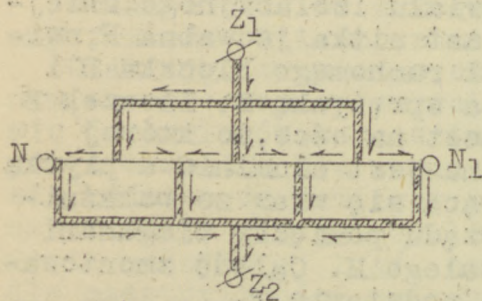


Rys.215. Amperomierz cieplny.

W amperomierzu cieplnym wykorzystane jest zjawisko rozszerzania się ciał pod wpływem wzrostu temperatury. Gdy przepuścimy prąd przez drucik D, nagrzeje się on, wydłuży i w rezultacie nitka, napinająca drucik F, przesunie się, obracając bloczek B wraz z przymocowaną doń wskazówką W. Jednocześnie pomiędzy biegunami magnesu M poruszy się

plytka A, wskutek czego zaindukują się w niej prądy wirowe, przeciwnie skierowane, zgodnie z regułą Lenza, ruchom bieżnik i wskazówki, a więc wszelkim jej drganiom, które w ten sposób zostają stłumione. Ponieważ na ogrzanie się drucika D potrzeba pewnego czasu, amperomierz cieplny odznacza się dużą bezwładnością. Ciepło wydzielające się w oporze, stawianym przepływowi prądu, jest proporcjonalne, jak wiemy, do kwadratu natężenia tego prądu. Dlatego też skala tego przyrządu nie jest równomierna, a zagęszczona na początku i rozrzedzona na końcu. Skala tego typu nazywa się skalą kwadratową.

Aby proces nagrzewania się nie trwał zbyt długo, drucik D musi być względnie cienki, to też przy pomocy amperomierza cieplnego,



Rys. 216. Urządzenie, powiększające zakres amperomierza.

o ile nie jest on zaopatrzony w specjalne urządzenia dodatkowe, można mierzyć prądy stałe o natężeniu do 0,5 A. Przepuszczenie przez drucik D prądu o większym natężeniu spowodować może jego przegrzanie się i stopienie. Do pomiarów prądów, przekraczających 0,5 A /ale nie większych od 3 A./, stosuje się urządzenie, pokazane na rys. 216. Drucik NN₁, odpowiadający drucikowi D z rys. 215, podzielony tu został na 6 równych części. Prąd, który wpływa do przyrządu przez zacisk Z₁, wypływa przez zacisk Z₂, przy czym po drodze rozgałęzia się dzięki paskom ze srebra, połączonym, jak na schemacie, z drucikiem NN₁. W rezultacie prąd o natężeniu 3 A. rozgałęzia się na sześć prądów składowych o natężeniu 0,5 A. każdy, przepływających przez poszczególne odcinki drucika NN₁ w kierunkach, zgodnych ze strzałkami, podanymi na rys. 216. Przy pomiarach prądów o natężeniu większym niż 3 A., sposób ten nie jest praktyczny, to też stosowane są wtedy boczniki.

Amperomierze cieplne są dość czułe i nadają się do pomiarów wartości skutecznej prądu zmiennego, szczególnie w obwodach wielkiej częstotliwości, ponieważ nie mają prawie żadnego oporu indukcyjnego, który uniemożliwia dokładne przeprowadzenia pomiaru natężenia prądów wielkiej częstotliwości przy pomocy przyrządów magnetycznych ze względu na stosowane w nich zwojnice. Straty mocy na oporze wewnętrznym przyrządu są jednak większe, niż w amperomierzach magnetycznych, chociaż przy umiejętnym doborze drucika platynowo-srebrnego zredukowane być mogą do minimum.

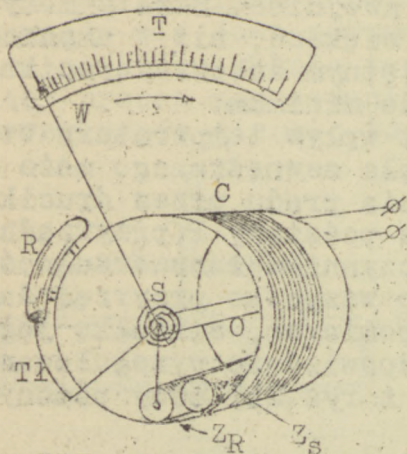
W amperomierzu cieplnym kłopotliwy jest wpływ temperatury otoczenia na przyrząd, który pod wpływem ciepła zewnętrznego może dać pewne wskazania nawet bez przepuszczenia prądu przez drucik. Wpływ ten zredukować można przez wykonanie podstawy P przyrządu rys.215/ z materiału o takim samym współczynniku rozszerzalności cieplnej, co i samego drucika. Jeżeli mimo wszystko przyrząd daje pewne wskazanie na skali przed właściwym pomiarem, strzałkę jego można ustawić w położeniu zerowym przez odpowiednie wyregulowanie naciągu drucika, odpuszczając sprężynkę S z rys.215 przy pomocy specjalnej śrubki regulującej.

Amperomierze elektromagnetyczne /z ruchomym rdzeniem/. Zasada działania tego typu amperomierzy polegać może albo na wzajemnym odpychaniu się dwóch jednoimiennych biegunów magnetycznych, albo na wzajemnym przyciąganiu się dwóch biegunów różnoimiennych.

Amperomierz pierwszego typu pokazany jest na rys.217. Wewnątrz zwojnicy C umieszczone są dwa pręty z miękkiego żelaza: Z_S - przytwierdzony na stałe do wewnętrznej ścianki zwojnicy i Z_R - ruchomy, osadzony wraz z przytwierdzoną doń wskazówką W na ośce O. Wskaźnik przyrządu zaopatrzony jest w sprężynkę powrotną S. Jeżeli przyrząd znajduje się w położeniu pionowym /np. zamocowany w tym położeniu

na stałe na jakiejś tablicy rozdzielczej/, sprężynka powrotna jest zbyt duża, bo wskaźnik przyrządu wróci do swego położenia pierwotnego pod wpływem ciężaru pręta ruchomego Z_R .

Gdy przez zwojnicę C przepuszczony zostanie prąd w dowolnym kierunku, powstanie wewnątrz niej pole magnetyczne, które spowoduje



jednocześnie namagnesowanie się obu końców obu prętów żelaznych, wewnątrz zwojniczy umieszczonych. Wskutek tego ruchomy pręt Z_R odpychnięty zostanie od pręta przytwierdzonego Z_S . Im większe będzie natężenie pola magnetycznego wewnątrz zwojniczy, tym większa będzie indukcja magnetyczna w prętach żelaznych /z zastrzeżeniem, że natężenie pola magnetycznego w zwojniczy nie spowoduje nasycenia magnetycznego w żelazie/, a, co za tym idzie, tym większa będzie siła wzajemnego odpychania się obu prętów, a więc i wychylenie wskazówki. Siła wzajemnego odpychania się obu prętów jest więc z jednej strony zależna od natężenia pola magnetycznego wewnątrz zwojniczy, a więc od natężenia przepływającego przez nią prądu, a z drugiej - od indukcji magnetycznej w prętach żelaznych, czyli również od natężenia tego prądu. W rezultacie siła ta jest zależna od iloczynu obu

Rys. 217. Amperomierz elektromagnetyczny, oparty na zasadzie wzajemnego odpychania się dwóch jednorodnych biegunów magnetycznych.

tych wartości, a więc od kwadratu prądu, z czego wynika, że skala tego typu przyrządu jest kwadratowa.

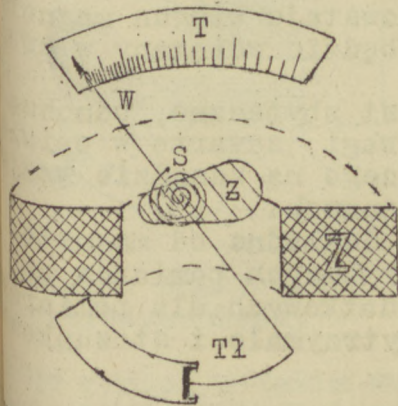
Tłumienie drgań wskazówki w tym przyrządzie zachodzi dzięki

oczkowi Tł, który przy wychyleniu się wskaźnika wchodzi w rurkę napotykać na opór powietrza. Ze względu na zagęszczenie skali na początku, przyrząd ten daje dokładne odczyty dla prądów o małych natężeniach. Poza tym wadą tego jest reagowanie na obce pola magnetyczne, powstające w jego bezpośrednim sąsiedztwie. Niedogodność tę usunąć można przez zaakrobienie amperomierza. Dokładność pomiarów nie jest również zbyt duża ze względu na histerezę magnetyczną w prętach żelaznych. Zredukować ten niepożądany efekt można przez użycie prętów, wykonanych specjalnych stopów o małej histerezie, np. ze stopu żelaza i niklu. Straty na ciepło w samej zwojnicy mogą być zmniejszone przez nawinięcie jej z drutu o dużym przekroju i zredukowanie jej wymiarów do minimum.

Amperomierz tego typu nadaje się zarówno do pomiaru natężenia prądu stałego, jak i zmiennego, ponieważ wraz ze zmianą kierunku przepływającego przez zwojnicę prądu zmienia się biegunowość obu prętów żelaznych jednocześnie, czyli efekt wzajemnego odpychania się prętów zostanie zachowany.

Należy zaznaczyć, że przyrządu tego typu można użyć do względnie dokładnych pomiarów natężeń prądów zmiennych o częstotliwości, dla jakiej amperomierz został zaprojektowany. W innych wypadkach błędy pomiaru znacznie się zwiększają.

Na zasadzie wzajemnego przyciągania się dwóch różnoimiennych biegunów magnetycznych oparte jest działanie amperomierza elektromagnetycznego, pokazanego



218. Amperomierz elektromagnetyczny, oparty na zasadzie wzajemnego przyciągania się dwóch różnoimiennych biegunów magnetycznych.

na rys. 218. W zwojnicy Z umieszczony jest rdzeń żelazny Z, umocowany decentrycznie /nie w środku ciężkości/ na osi. Do rdzenia tego przymocowana jest wskazówka W, poruszająca się po skali T i tłoczek T₁, tłumiący drgania wskazówki. Sprężynka S powoduje powrót wskaźnika przyrządu do położenia zerowego po każdorazowym pomiarze.

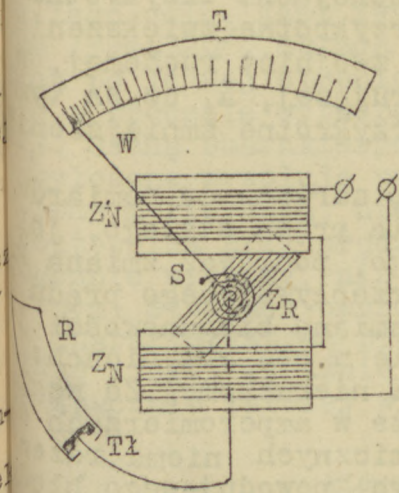
Wskutek przepływu prądu przez zwojnicę powstaje wewnątrz niej pole magnetyczne, wobec czego, wskutek indukcji magnetycznej, ruchomy rdzeń żelazny Z namagnesuje się. Jeżeli biegunowość zwojnicy będzie taka, że u góry mamy biegun N, to w części żelaza, zwróconej ku zwojnicy, powstanie biegun magnetyczny S, jeżeli zaś u góry zwojnicy mamy biegun S, to w tej samej części ruchomego rdzenia powstanie biegun N. Widzimy więc, że w każdym wypadku w części rdzenia ruchomego, zwróconej ku zwojnicy, powstaje biegun magnetyczny o znaku przeciwnym, wskutek czego rdzeń będzie wciągany w zwojnicę i wskazówka na skali się wychyli.

Bliższe omówienie tego typu przyrządu jest zbyt trudne, odnoszą się doń bowiem w równym stopniu wszystkie uwagi, zawarte w opisie amperomierza elektromagnetycznego, działającego na zasadzie wzajemnego odpychania się dwóch biegunów jednoimiennych.

Amperomierze elektromagnetyczne są mniej dokładne od magnetoelektrycznych, nadają się jednak doskonale do grubszych pomiarów prądów o dużym natężeniu, nie wymagają urządzeń dodatkowych dla pomiarów natężeń prądów zmiennych, są mechanicznie wytrzymałe i stosunkowo tania.

12. Amperomierz elektrodynamiczny. Na rys. 219 pokazana jest budowa amperomierza elektrodynamicznego. Składa się on z dwóch zwojnic: jednej nieruchomej, dwuczłonowej Z_N i drugiej ruchomej Z_R. Do zwojnicy ruchomej przymocowana jest wskazówka W, poruszająca się po skali T, sprężynka powrotna S oraz tłoczek T₁, tłumiący drgania wskazówki. Gdy prąd przepływa przez uzwojenia obu zwojnic, powstają

nich dwa pola magnetyczne i zwojnica wewnętrzna wychyli się, dając nam na skali odczyt natężenia przepływającego prądu. Wchylenie zwojnic ruchomej zależy zarówno od natężenia pola magnetycznego w zwojnicy nieruchomej czyli sterującej, lub, co na jedno wychodzi, od natężenia przepływającego przez nią prądu, jak i od natężenia pola magnetycznego, powstającego wewnątrz zwojnic nieruchomej, czyli również od natężenia przepływającego przez nią prądu. Wobec tego wychylenie wskaźnika jest proporcjonalne do iloczynu obu pól magnetycznych, czyli do kwadratu prądu, skala przyrządu jest więc kwadratowa. Ponieważ jednak pole wewnątrz zwojnic nie jest jednorodne, rozrzedzenie podziałki na końcu skali jest znacznie mniejsze, niż w amperomierzu elektromagnetycznym lub cieplnym. Dzięki umiejętnemu doborowi kształtu i współczynników indukcyjności wzajemnej i własnej obu zwojnic, można doprowadzić siłę, działającą na wskaźnik przyrządu do zależności prawie wprost proporcjonalnej od natężenia przepływającego prądu; w takim wypadku skala amperomierza elektrodynamicznego może być prawie tak samo równomierna, co i skale przyrządów magnetoelektrycznych.

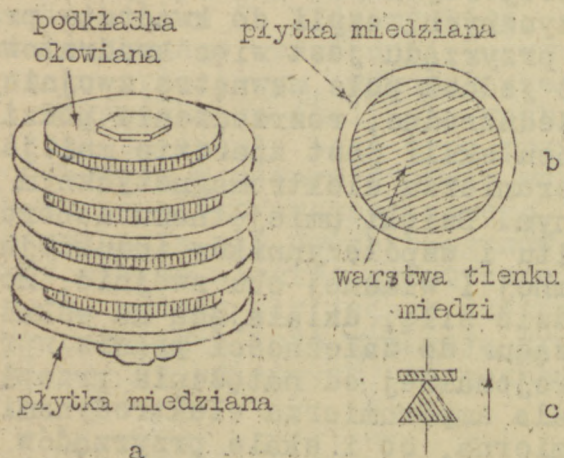


Rys. 219. Amperomierz elektrodynamiczny.

Oba człony zwojnic nieruchomej można ze sobą połączyć szeregowo lub równolegle, w zależności od natężenia prądu, jakie mamy zmierzyć. Celem zmniejszenia oporu rzeczywistego przyrządu przy pomiarach natężenia prądów silnych oba człony zwojnic nieruchomej łączy

się równolegle. Zakres przyrządu można dowolnie zmieniać przez zmianę /zwykle przy pomocy specjalnego przełącznika/ odpowiedniej ilości zwojów, stanowiących uzwojenia obu członów zwojnicy nieruchomej, która jest w tym celu nawinięta w sekojach. Trzykrotne zmniejszenie ilości tych zwojów powoduje trzykrotne zwiększenie natężenia pola magnetycznego, powstającego w zwojnicy ruchomej, sunku do pola magnetycznego w zwojnicy sterującej, a, co za tym idzie, trzykrotne zwiększenie czułości i trzykrotne zmniejszenie zakresu amperomierza.

Amperomierz elektrodynamiczny nadaje się zarówno do pomiarów natężenia prądu stałego, jak i



zmiennego, ponieważ zmiana kierunku przepływającego prądu powoduje zmianę biegunowości jednocześnie w obu zwojnicach: ruchomej i nieruchomej. Ze względu na to, że w amperomierzach elektrodynamicznych nie ma rdzenia żelaznego, powodującego błędy pomiaru natężenia prądów zmiennych ze względu na histerezę magnetyczną, mają one jedną poważną zaletę w stosunku do elektrodynamicznych przyrządów: przy odpowiednio starannym wykonaniu dokładność ich wskazań nie zależy od częstotliwości zmian prądu.

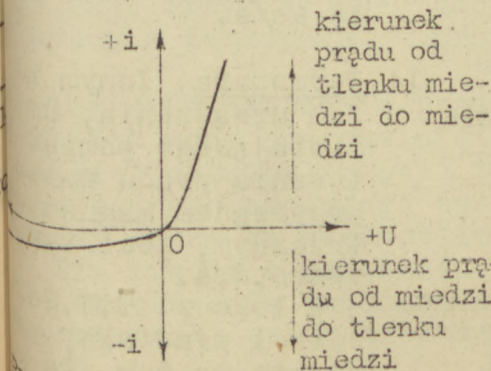
Rys.220. Prostownik miedziany czyli kuprytowy.

- a. Widok z boku.
- b. Widok jednej z płytek z góry.
- c. Symbol rysunkowy.

prostowniki. Jednym ze sposobów przystosowania przyrządów magneto-
elektrycznych do pomiarów natężenia prądów zmiennych jest, jak
już to zostało zaznaczone, użycie prostownika. Prostownik, używany
do tego celu, jest zwykle prostownikiem miedziowym czyli kupryto-
wym /rys.220/. Składa się on z kilku płytek miedzianych; utlenio-
nych po jednej stronie i przełożonych płytkami ołowianymi. Utlenie-
nie w procesie wytwórczym otrzymane jest na drodze termoelektrycz-
nej. Cechą charakterystyczną takiego układu jest to, że napięcia
przyłożone wywołują przepływ prądu o znacznie większym natężeniu
w jednym kierunku, niż w drugim. Oznacza to poprostu, że opór
prostownika przy prądzie, przepływającym w jednym kierunku, jest
znacznie większy, niż w wypadku przepływu prądu w kierunku prze-
ciwnym. Stosunek oporów może być rzędu 1000:1.

Charakterystyka prostownika miedziowego podana jest na rys.221.
Widac z niej wyraźnie, że prąd przez prostownik kuprytowy przepły-
wa znacznie łatwiej w kierunku od tlenku miedzi do miedzi, niż w kie-

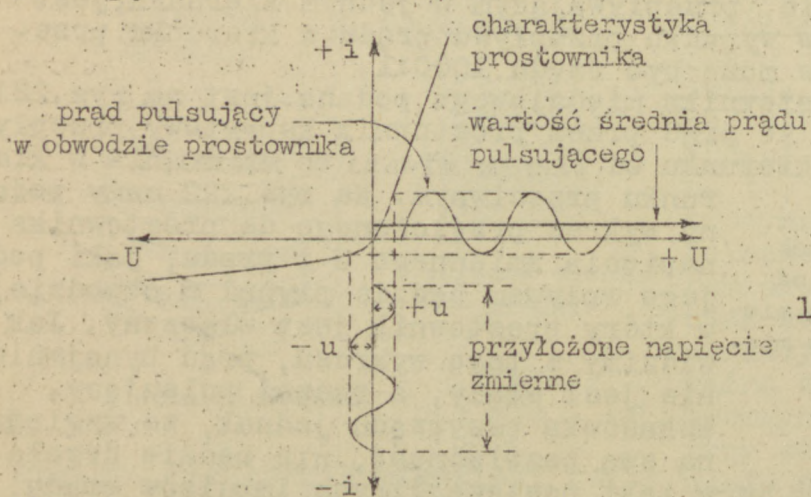
runku przeciwnym. Na rys.222 mamy poda-
ny wykres przyłożonego do prostownika
napięcia zmiennego U i prądu, jaki pod
jego wpływem będzie płynął w obwodzie,
w który prostownik jest włączony. Jak
widzimy z tego wykresu, prąd bynajmniej
nie jest stały, a raczej pulsujący.
Wskazówka przyrządu jednak, ze względu
na swą bezwładność, nie będzie drgała
w takt poszczególnych impulsów prądu,
a zajmie po wychyleniu się pewne stałe
położenie na skali przyrządu, dając od-
czyt wartości średniej prądu przepływa-
jącego.



rys.221. Charakterystyka
prostownika miedziowego.

Przyrządy magnetoelektryczne

z prostownikiem nadają się doskonale do pomiarów natężenia prądów słabych. Wielkość krążków miedzianych zależy od natężenia prądu /wg danych z tablic amerykańskich krążek o powierzchni $3/16$ cala kwadratowego umożliwia pomiar prądów o natężeniu do 5 mA./ . Przy zbyt małej powierzchni krążków warstwa tlenku miedzi się nagrzewa, co powoduje błędy w pomiarach wskutek zmiany charakterystyki prostownika. Gdy napięcia, przyłożone do prostownika są duże, należy połączyć ze sobą szeregowo większą ilość krążków, co przy wielkich częstotliwościach spowodować może błędy w pomiarach wskutek międzykrążkowej pojemności prostownika. W niektórych wypadkach błędy te mogą dochodzić do 1% na 1 kc/sek. Na ogół jednak, dla celów



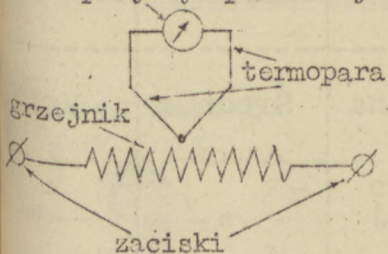
Rys.222. Wykres przyłożonego do prostownika napięcia zmiennego u , prądu pulsującego w obwodzie prostownika i jego wartości średniej.

praktycznych, przyrządy magnetoelektryczne z prostownikami są wystarczająco dokładne dla pomiarów natężenia prądów zmiennych o częstotliwości do 15 Mc/s.

14. Termopara. Innym rodzajem urządzenia, umożliwiającego pomiar natężenia prądu zmiennego przyrządem magnetoelektrycznym, jest tzw. termopara.

W 1826 r. T.J. Seebeck odkrył zjawisko, polegające na tym, że gdy dwa różne metale

zostaną podgrzane w miejscu połączenia, na ich wolnych końcach powstaje stała siła elektromotoryczna. Zjawisko to prawdopodobnie zachodzi wskutek różnorodności ruchu podgrzanych elektronów w obu metalach. W praktycznych układach używa się przeważnie następującej pary metali /tzw. termopary/: konstantanu /stop, składający się z 55% miedzi i 45% niklu/ i miedzi. Na końcach tego rodzaju przyrząd pomiarowy



termopary powstaje SEM $45 \mu\text{V}$ na 1°C . Jeżeli termoparę podgrzewać będziemy przy pomocy małego grzejnika z drutu oporowego, a wolne jej końce połączymy z przyrządem pomiarowym /rys.223/, przez przyrząd ten popłynie prąd, którego natężenie zależy pośrednio od natężenia prądu, przepływającego przez grzejnik i powodującego podgrzanie termopary. W rezultacie wychylenie wskazówki przyrządu dać może na skali bezpośredni odczyt natężenia prądu, przepływającego przez grzejnik.

Rys.223. Przyrząd pomiarowy z termoparą.

Przyrząd z termoparą nadaje się doskonale do pomiarów natężenia prądów o wielkiej częstotliwości, ponieważ grzejnik może być nawinięty bifilarnie /bezindukcyjnie/; prąd wielkiej częstotliwości, przepływając przez przyrząd, nie napotka więc żadnego urojonego oporu indukcyjnego. Dokładność pomiaru nie zależy zatem od częstotliwości zmian prądu mierzonego.

Dla prądów o natężeniu poniżej 100 mA. zamyka się termoparę, dla zwiększenia czułości przyrządu, w bańce szklanej, opróżnionej z powietrza, celem uniknięcia rozproszenia ciepła.

15. Tabelaryczne zestawienie cech charakterystycznych najpowszechniej używanych typów przyrządów pomiarowych.

Budowa przyrządu	Wytrzymałość mechaniczna	Zastosowanie	Układ skali	Dokładność	Straty mocy
Ciepłny	mała	~ / prąd zmienny / = / prąd stały /	Kwadratowa	Mała	Duże
Elektromagnetyczny	duża	= i ~ / tyłko o małej częst. zmian /	Kwadratowa lub zbliżona do kwadr.	Średnia	Małe
Elektrodynamiczny	duża	— " —	Zbliżona do kwadratowej lub prawie równomierna	— " —	— " —
Magnetoelektryczny	średnia	=	Równomierna	Duża	Bardzo małe
Magnetoelektryczny z termoparą	mała	= i ~ / o dowolnej częstotliwości /	Kwadratowa lub prawie równomierna	— " —	Duże

16. Dokładność amperomierzy. P.N.E. /Polskie Normy Elektryczne/ nie obejmowały norm obowiązujących dla przyrządów pomiarowych. W Wielkiej Brytanii obowiązuje następujący podział przyrządów na klasy w zależności od dokładności wskazań:

1. Klasa wzorcowa.
2. Przyrządy pierwszej klasy.
3. Przyrządy drugiej klasy.

Dopuszczalne błędy dla amperomierzy wahają się w granicach od 0,3 % do 4 %. Poniższa tabelka pozwala na względne zorientowanie się w normach angielskich. 1)

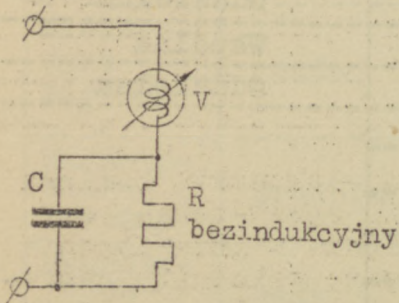
Rodzaj przyrządu	Klasa	Dopuszczalny błąd pomiaru	Obudowa amperomierza i bocznika. 2)	
Amperomierze dowolnego typu	Wzorcowa	0,5 %	Wspólna	
		0,3 %	Oddzielna	
	Pierwsza	2 %	Wspólna	
		1 %	Oddzielna	
	Druga	4 %	Wspólna	
2 %		Oddzielna		
Amperomierze elektromagnetyczne	Pierwsza	2 %		
		Druga	4 %	
Amperomierze elektrodynamiczne i magnetoelektryczne	Wzorcowa	0,5 %		
		Pierwsza	2 %	
			Druga	4 %

- 1) Skompilowane na podstawie danych z tabel British Engineering Standard Association.
- 2) Różnice w dopuszczalnych błędach pomiaru dla przyrządów z bocznikami wbudowanymi i oddzielnymi wynikają stąd, że wpływ zmian temperatury bocznika na sam mechanizm przyrządu jest przy oddzieleniu go wyeliminowany.

R o z d z i a ł 3.

Pomiary napięć, spadków napięć i SEM.

1. Ogólny opis woltomierzy. Poprzednio już poruszone zostały /Rozdz. 1, par. 1/ zasadnicze różnice pomiędzy amperomierzami i woltomierzami. Jak wiemy, każdy amperomierz zamieniony może być na woltomierz przez szeregowe włączenie w jego obwód tzw. opornika dodatkowego. Budowa woltomierzy, z wyjątkiem drobnych szczegółów, nie różni się zatem w zasadzie od budowy amperomierzy. Tak więc np. woltomierz cieplny ma zwykle znacznie cieńszy drucik platynowo-srebrny, ponieważ



Rys. 224. Opór dodatkowy, zabocznikowany kondensatorem.

przezeń prąd o bardzo małym natężeniu. W woltomierzach elektromagnetycznych i elektrodynamicznych opór dodatkowy zwykle zabocznikowany jest kondensatorem w celu uniknięcia błędów w pomiarach napięć /lub spadków napięć/ zmian o różnych częstotliwościach /rys. 224/. Opór ten jest nawinięty bezindukcyjnie /bifilarnie/. Gdy opór urojony uzwojeń amperomierza wzrasta wraz z wzrostem częstotliwości zmian przepływającego prądu, opór urojony kondensatora maleje. Kondensator ten jest tak dobrany, że powoduje on utrzymanie stałej wartości oporu wypadkowego całego układu w odpowiednim zakresie częstotliwości.

Wielozakresowe woltomierze zaopatrzone są w kilka oporów dodatkowych lub jeden opór uniwersalny z odpowiednimi odczepami.

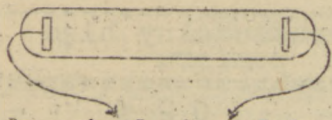
Dla woltomierzy normy angielskie przewidują następujące dopuszczalne błędy pomiaru: 1)

Rodzaj przyrządu	Klasa	Dopuszczalny błąd pomiaru
Woltomierze dowolnego typu	Wzorcowa	0,2 %
	Pierwsza	1 %
	Druga	2 %
Woltomierze elektromagnetyczne	Pierwsza	1 %
	Druga	2 %
Woltomierze elektrodynamiczne i magnetoelektryczne	Wzorcowa	0,2 %
	Pierwsza	1 %
	Druga	2 %

Wskaźnik neonowy. Gdy nie chodzi nam o dokładne dokonanie pomiaru napięcia lub spadku napięcia, a tylko o szybkie sprawdzenie, czy w obwodzie mamy napięcie /np. sprawdzenie napięcia w gniazdkach sieci lub na zaciskach baterii/, używa się często wskaźnika neonowego, czyli tzw. "neonówki" /rys.225/. Wskaźnik ten składa się z rurki szklanej, wypełnionej rozrzedzonym neonem /gaz szlachetny/, w którą wtopione są dwie elektrody. Jeśli do elektrod przyłożone zostanie odpowiednie napięcie /rzędu co najmniej kilkudziesięciu woltów/, gaz w rurce będzie się żarzył, dając charakterystyczne, czerwone światło. Wskaźnik ten nie nadaje się do niskich napięć,

1) Skompilowane na podstawie danych z tabel British Engineering Standard Association.

gdy jednak mamy do czynienia z odpowiednio dużymi napięciami, często jest stosowany, szczególnie jako stały wskaźnik tablicowy, ze względu na mały prąd, jaki przezeń przepływa.



do gniazd sieci lub zacisków baterii

Rys. 225. Wskaźnik neonowy.

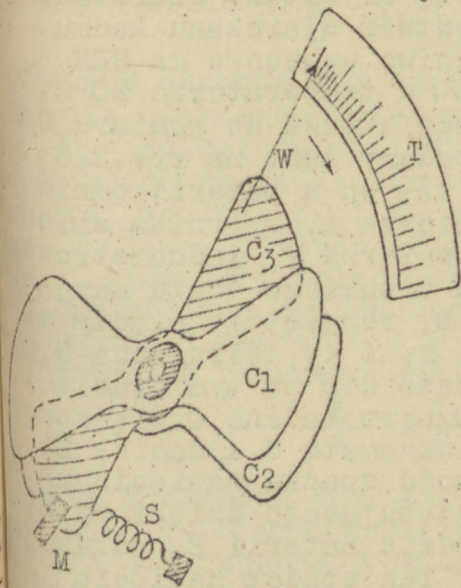
ruchomej / C_3 /, do której przymocowana jest wskazówka W , wychylająca się po tarczy T . Drgania jej tłumione są prądami wirowymi, indukującymi się w ruchomej płytce dzięki magnesowi M . Sprężynka powrotna S powoduje powrót płytki ruchomej do położenia zerowego po każdym dorazowym pomiarze.

Dzięki przyłożonemu napięciu do płytek przyrządu, zbierają się na nich ładunki różnoimienne /niezależnie od tego, czy napięcie przyłożone jest stałe, czy zmienne/, co powoduje wzajemne przyciąganie się płytek i wychylenie płytki ruchomej. Wadą tego typu woltomierza jest konieczność przyłożenia do płytek napięcia rzędu co najmniej kilkuset woltów, aby efekt wzajemnego przyciągania się wywołał wystarczające wychylenie się wskazówki, umożliwiające wyraźny odczyt na skali; co za tym idzie, przyrząd ten nie nadaje się do pomiarów niskich napięć. Wychylenie wskazówki zależy od siły wzajemnego przyciągania się obu płytek, a więc, zgodnie z prawem Coulomba, od kwadratu ładunku, czyli od kwadratu przyłożonego napięcia. Z tego względu skala przyrządu jest kwadratowa.

Aby uniknąć wpływu obcych pól elektrycznych, przyrząd jest

3. Woltomierz elektrostatyczny. Do pomiarów dużych napięć o niezbyt wielkiej częstotliwości używany jest często, szczególnie w laboratoriach, woltomierz elektrostatyczny /rys. 226/. Składa się on z dwóch płytek C_1 i C_2 , połączonych ze sobą i przymocowanych do podstawy przyrządu, oraz z trzeciej

elektrostatycznie zaekranowany w uziemionej metalowej obudowie. Zaletą tego typu przyrządu jest niezależność jego od zmian temperatury otoczenia i małe straty na mocy przy napięciach o małej częstotliwości. Przy częstotliwościach powyżej 1 Mc/s., mogą w częściach izolujących powstać znaczne nawet prądy przesunięcia, powodujące niedopuszczalne błędy pomiaru.



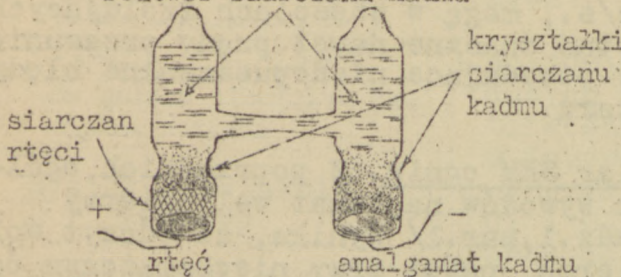
4. Pomiar SEM ogniw. Z poprzednich, ogólnych wywodów na temat woltomierzy /rozd.1, par.1/ wynika, że odczyt woltomierza, nawet przy nieobciążonym ogniwie i dużym oporniku dodatkowym przyrządu, daje tylko zbliżoną do SEM wartość. Gdy oporność wewnętrzna ogniwa jest stosunkowo nieznaczna /np. oporność wewnętrzna ogniwa akumulatorowego naładowanego wynosi ok. 0,002 Ω /, spadek napięcia na tym oporze jest tak mały, że praktycznie można pominąć tę różnicę. Inaczej jednak sprawa się przedstawia, gdy mamy zmierzyć SEM ogniwa pierwotnego, w którym wewnętrzna polaryzacja, zachodząca nawet w wypadku bezczynności ogniwa, powoduje ciągle zmiany jego

Rys.226. Woltomierz elektrostatyczny.

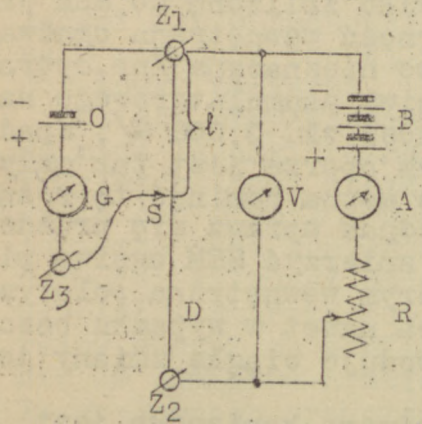
oporności wewnętrznej i SEM.

Dla dokładnego pomiaru SEM ogniwa pierwotnego konieczne jest użycie ogniwa wzorcowego o SEM, odznaczającej się dużą stałością. Rolę takiego ogniwa spełnić może ogniwo kadmowe /rys.227/. Składa się ono z zamkniętego naczynia szklanego w kształcie litery H,

w którym rolę elektrody dodatniej spełnia rtęć, a ujemnej - amalgamat kadmu, analogiczny do cynku w ogniwie Leclanché. Pozostałe składniki tego ogniwa stanowią: siarczan rtęci, krysztalki siarczanu kadmu i roztwór siarczanu kadmu.



Rys.227. Wzorcowe ogniwo kadmowe.



Rys.228. Schemat układu, służącego do pomiaru SEM ogniwa.

typu ogniwo wzorcowe ma SEM 1,0183 V, w temperaturze 20°C.

Schemat układu do pomiaru SEM ogniwa podany jest na rys.228. Składa się on z baterii ogniwa B, amperomierza A, opornika zmiennego R, woltomierza V, jednometrowego kawałka cienkiego drutu manganowego D, rozpiętego między zaciskami Z₁ i Z₂, ślizgacza S, przesuwającego się po tym drucie i

galwanometru G. Ogniwo badane O włączone jest pomiędzy galwanometr G a zacisk Z₁, jak na rysunku. Wielkość spadku napięcia na całym drucie D, występującego dzięki przepływowi prądu w obwodzie baterii B, wskazuje nam woltomierz V. Ten spadek napięcia jest tak dobrany, że różnica potencjałów na zaciskach Z₁ i Z₂ jest zawsze nieco większa od SEM badanego ogniwa. Gdy zatem ślizgacz S przesuniemy do zacisku Z₂, przez obwód ogniwa O przepłynie prąd, powodując wychylenie się wskazówki galwanometru. W miarę zbliżenia ślizgacza S w kierunku zacisku Z₁ spadek napięcia pomiędzy S a Z₁ będzie maleł, aż w pewnym momencie zrówna się on z SEM ogniwa. Strzałka galwanometru G ustawi się

wówczas w położeniu zerowym. Obliczenie SEM ogniwa nie sprawia nam teraz żadnych trudności, ponieważ

$$\frac{E}{V} = \frac{l \text{ cm.}}{100 \text{ cm.}}, \text{ skąd } E = V \cdot \frac{l}{100} \text{ woltów,}$$

gdzie E oznacza SEM ogniwa badanego, V - spadek napięcia na całym drucie, wskazany przez woltomierz, 100 cm. - długość całego drutu, a l - odległość pomiędzy ślizgaczem S a zaciskiem Z_1 , którą odczytać można na podziałce metrowej, w jaką zaopatrzona jest deska, do której zaciski Z_1 i Z_2 są przykręcone.

Ponieważ dokładność dokonanego pomiaru zależy w znacznym stopniu od dokładności woltomierza, należy użyć ogniwa wzorcowego, włączając je na miejsce ogniwa badanego i powtarzając pomiar. Jeżeli teraz ślizgacz S znajdzie się w jakiejś odległości m od zacisku Z_1 , SEM poprzednio badanego ogniwa łatwo obliczyć można z wzoru:

$$\frac{E}{E_w} = \frac{l}{m}, \text{ skąd } E = E_w \cdot \frac{l}{m},$$

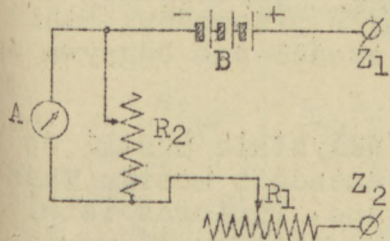
gdzie E oznacza SEM ogniwa badanego, E_w - SEM ogniwa wzorcowego /1,0183 V. w przypadku użycia wzorcowego ogniwa kadmowego/, l - odległość ślizgacza S od zacisku Z_1 przy badaniu ogniwa, którego SEM mamy znaleźć, a m - odległość ślizgacza S od zacisku Z_1 przy powtórzeniu pomiaru z ogniwem wzorcowym.

R o z d z i a ł 4.

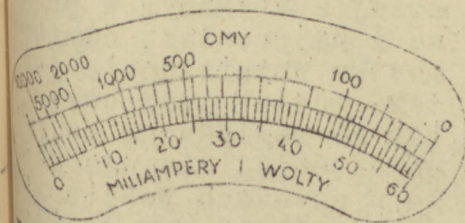
Pomiary oporności, indukcyjności i pojemności.

1. Ogólne omówienie pomiarów oporności. Przyrządy do pomiaru oporności oparte są albo na zasadzie mostku Wheatstone'a /Część I, Rozdz. 7, par. 1/, albo na pomiarze spadku napięcia na nieznanym oporze oraz przepływającego prądu i zastosowaniu prawa Ohma. Przyrządy do pomiaru oporności urojonej lub wypadkowej w obwodach prądu zmiennego oparte są przeważnie na pierwszej zasadzie, przyczym do pomiarów stosuje się w tych wypadkach źródła SEM zmiennej. Przyrządy pomiarowe wielokrotne zaopatrzone są prawie zawsze w omomierz, oparty na drugiej zasadzie.
2. Omomierz w wielokrotnych przyrządach pomiarowych. Aby przyrządem pomiarowym wielokrotnym /często też zwanym uniwersalnym / można było dokonywać pomiarów oporności, przyrząd ten jest zaopatrzony w ogniwo lub baterię ogniw /B na rys. 229/. Oporniki regulowane R_1 i R_2 mają na celu utrzymanie napięcia ogniwa /lub baterii/ na zaciskach Z_1 i Z_2 oraz jego oporności wewnętrznej na jednym poziomie. Ponieważ z czasem oporność wewnętrzna ogniwa rośnie, co mogłoby spowodować fałszywy pomiar, korekcja umożliwiona jest przez przesunięcie ślizgacza bocznika R_2 . W miarę spadku SEM ogniwa, przesuwa się ślizgacz opornika R_1 w prawo, co nam daje na zaciskach Z_1 i Z_2 napięcie stałe. Bateria B jest zwykle tak dobrana, że zwarcie zacisków Z_1 i Z_2 powoduje pełne wychylenie się wskazówki amperomierza na skali. Punkt ten, jeżeli zakres amperomierza wynosi np. od 0 do 100 mA., oznaczony jest na skali liczbą 100 na części tarczy, wyskalowanej w miliamperach, a przez zero na części skali, odnoszącej się do omomierza. Gdy zaciski Z_1 i Z_2 nie są ze sobą połączone, prąd

przez amperomierz nie płynie i strzałka jego utrzymuje się w położeniu zerowym. Oporność między zaciskami Z_1 i Z_2 równa się wtedy nieskończoności. Dlatego też w tym miejscu skali, gdzie mamy położenie zerowe dla amperomierza, część tarczy, odnosząca się do omomierza, oznaczona jest przez ∞ /nieskończoność/. Jeżeli między zaciski Z_1 i Z_2 włączymy jakiś opornik, natężenie prądu, przepływającego przez obwód amperomierza, zależne będzie od oporności tego opornika, z czego wynika, że i wychylenie strzałki na skali będzie się zmieniało. Skalę omomierza pomiędzy 0 a ∞ możemy wycechować bezpośrednio w omach. Nie będzie ona równomierna, a będzie się przedstawiała, jak na rys.230. Skalę tego typu nazywamy hyperboliczną.1)



Rys. 229. Omomierz w uniwersalnym przyrządzie pomiarowym.



Rys. 230. Skala uniwersalnego przyrządu pomiarowego.

Zakres omomierza tu opisanego zmieniać możemy przez zmianę napięcia baterii B /łącząc ze sobą szeregowo mniej lub więcej ogniw/. Najczęściej spotykanymi zakresami w przyrządach uniwersalnych są:

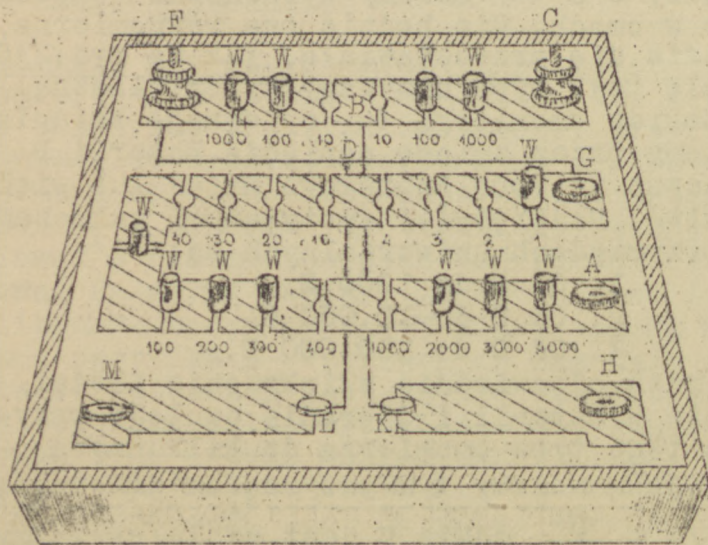
1. Od 0 do 1000 Ω .
2. Od 0 do 10.000 Ω .
3. Od 0 do 100.000 Ω .

Przez odpowiednie zwiększenie ilości ogniw w baterii i dobranie czułego przyrządu można zwiększyć zakres tego typu omomierza do kilkunastu megomów. Najmniejsza oporność, jaką możemy tym przyrządem zmierzyć,

1) Wykres funkcji $y = \frac{a}{x}$ / $R = \frac{U}{I}$, gdzie U jest stałe/nazywamy hyperbolą.

ograniczona jest pojemnością ogniwa, a, co za tym idzie, jego wytrzymałością na prąd o dużym natężeniu /co się również tyczy przyrządu pomiarowego, o ile nie jest zaopatrzony w odpowiednie boczniaki/. Poza tym w grę wchodzi tu oporność samych przewodów, która przy pomiarach elementów o oporności rzędu części oma odgrywa dużą rolę i może spowodować fałszywy pomiar.

3. Mostki do pomiarów oporności rzeczywistej. Wszystkie mostki do pomiarów oporności rzeczywistej oparte są na zasadzie mostku Wheatstone'a, jak to już poprzednio było zaznaczone. Ponieważ istnieje bardzo wiele tego rodzaju mostków, ograniczymy się tu do wymienienia i opisanie tylko najbardziej typowych.

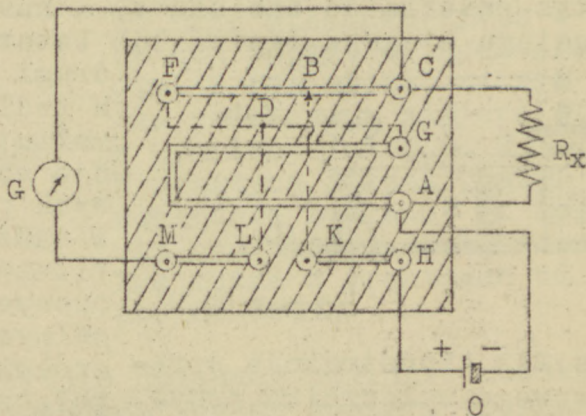
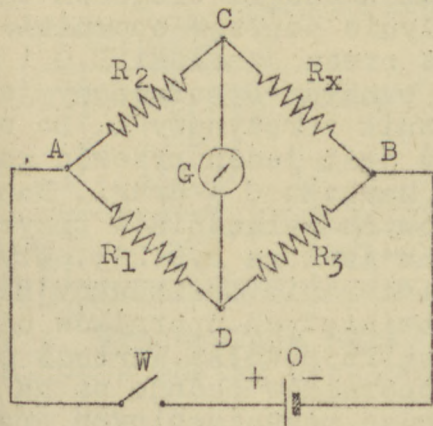


Rys.231. Mostek pocztowy.

4. Mostek pocztowy. Najczęściej spotykanym w praktyce i najprostszą odmianą mostku Wheatstone'a jest tzw. mostek pocztowy, zwany tak ze względu na to, że najczęściej stosuje się go w obwodach pocztowych /szczególnie w W. Brytani. Zewnętrzny widok mostka pokazany jest na rys. 231, a jego schemat ideowy - na rys. 232. Obok schematu ideowego podany jest dla porównania schemat mostka Wheatstone'a, przy czym na wszystkich trzech rysunkach zostały dla

Przejrzystości zachowane te same oznaczenia literowe.

Mostek pocztowy składa się z szeregu oporników, w gruncie rzeczy jednak nie różni się niczym od mostku Wheatstone'a, jak to wiadac z rys.232. Przypominamy /por.Cz.I,Rozdz.7,par.1/, że strzałka



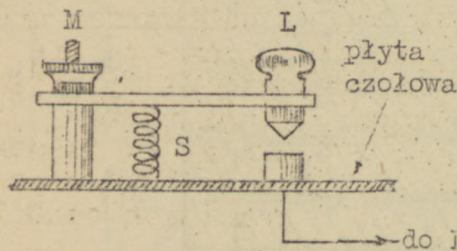
Rys.232. Schemat mostka pocztowego do pomiaru oporności rzeczywistej.

galwanometru nie wychyli się, o ile spełniony zostanie warunek

$$\frac{R_x}{R_3} = \frac{R_2}{R_1}.$$

Rozpatrzmy teraz obiegi prądów, począwszy od ogniwa O /lub baterii/, której bieguny połączone są z zaciskami H i A na płycie żelazowej pudełka. Zacisk H zaopatrzony jest w ramię HK, na którym stanowi sprężynowy wyłącznik przyciskowy. Wyłącznik ten połączony

jest grubym drutem wewnątrz pudełka z nakładką metalową B. W punkcie B prąd rozgałęzi się, przyczym część jego popłynie od B do C poprzez oporniki, umieszczone wewnątrz pudełka, a następnie poprzez opornik badany do zacisku A, połączonego z drugim biegunem ogniwa lub baterii. Pozostała część prądu popłynie poprzez oporniki wewnątrz pudełka do zacisku F, a następnie przez zaciski D, G i A do drugiego bieguna ogniwa lub baterii. Z punktem D połączony jest



Rys.233. Konstrukcja sprężynowego wyłącznika przyciskowego.

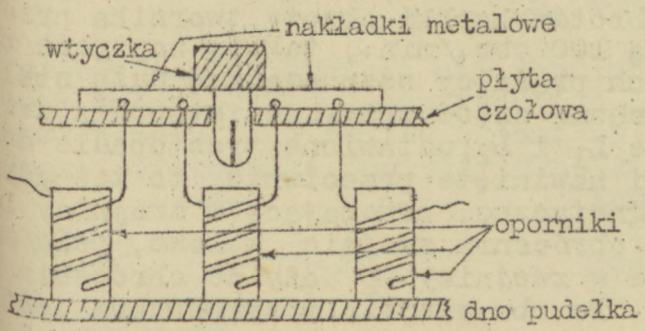
drugi wyłącznik sprężynowy L. Do zacisku M podłączony jest jeden przewód galvanometru, a do zacisku C - drugi. Konstrukcja sprężynowych wyłączników przyciskowych pokazana jest na rys.233. Wtyczki służą do zwierania bezindukcyjnie/bifilarnie/ nawiniętych oporników umieszczonych wewnątrz pudełka. Wartość poszczególnych oporników podane są na płycie czołowej. Końce poszczególnych oporników połączone są z nakładkami metalowymi na płycie czołowej. Przez wprowadzenie wtyczki pomiędzy nakładki każdy z oporników może być zwarty. Konstrukcję nakładek i oporników wyjaśnia

rys.234.

Procedura dokonywania pomiaru jest następująca: Po podłączeniu opornika mierzonego, ogniwa i galvanometru do odpowiednich zacisków pudełka /jak na rys.232/, dobiera się opornik pomiędzy punktami BF i BC tak, aby oporności ich były sobie równe. Następnie, przez zwarcie odpowiednich nakładek wtyczkami pomiędzy punktami G i A, dobiera się oporność od G do A /odpowiadającą R_3 z mostka Wheatstone'a/ tak, aby wskazówka galvanometru znalazła się jaknajbliżej położenia zerowego. Z położenia wtyczek W na płycie czołowej

Pomiędzy punktami G i A zorientować się teraz możemy co do oporności R_x z przybliżeniem do 1Ω , jeśli R_x ma oporność rzędu kilku Ω . Dobranie stosunku oporności pomiędzy punktami BF i BC tak, aby $BF/BC = 10 / t.j. R_1/R_2$ w mostku Wheatstone'a = $10/$, daje nam,

przy powtórnym zrównoważeniu układu, odczyt dziesiątych części oma. Powtórzenie pomiaru przy stosunku $BF/BC = 100$ da nam odczyt setnych części oma. W ten sposób zakres mostka pocztowego zawiera się w granicach od $0,01 \Omega$ do $1 M\Omega$. W praktyce jednak pomiar względnie dokładny /z dopuszczalnym błędem do 1% / uzyskać można w granicach od $0,1\Omega$ do 100.000Ω .

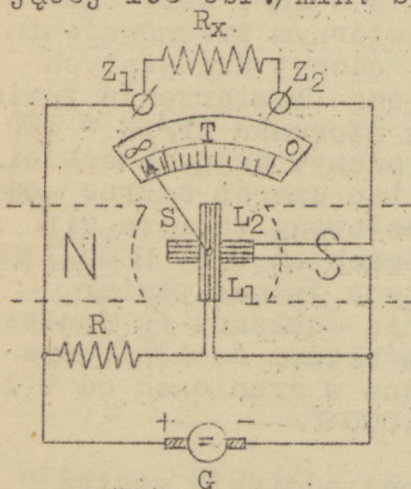


Rys. 234. Konstrukcja nakładek i oporników w mostku pocztowym.

Mostki elektrodynamiczne. W poprzednio opisanej odmianie mostka Wheatstone'a i w całym szeregu innych mostków do pomiaru oporności zakres zależny jest zarówno od czułości użytego galwanometru, jak od napięcia baterii. Uniezależnienie się od czułości przyrządu jest niemożliwe, natomiast można się łatwo uniezależnić od napięcia przyłożonego przez zastosowanie zamiast galwanometru przyrządu elektrodynamicznego. Większość obecnie spotykanych w praktyce mostków do pomiaru oporności zbudowana jest właśnie na tej zasadzie.

Prototypem tego rodzaju mostków był mostek Eversheda i Vignole'a (rys. 235/), który się obecnie często spotyka. Używany jest on często do pomiarów dużych oporności, szczególnie przy badaniu izolacji instalowanych przewodników. W praktyce często się również można spotkać z błędną nazwą "induktora", utartą wśród elektromonterów.

W mostek ten wbudowana jest na stałe mała prądnicą G , ręcznie napędzana, która daje przy szybkości obrotów twornika, przekraczającej 100 obr./min. stałe napięcie 250 lub 500 V. Przekładnia kor-



Rys.235. Mostek Eversheda i Vignole'a.

część przyrządu wychyli się, dając nam odczyt na skali. Zakres przyrządu zawiera się zwykle w granicach od 10.000 Ω do 100 M Ω . W przyrządzie tego typu często spotyka się duży magnes stały, w którego polu magnetycznym o dużym natężeniu umieszczone są obie zwojnice /N i S na rys.235/.

Odmianą tego typu przyrządu jest mostek elektrodynamiczny, połączony z najprostszym typem mostka Wheatstone'a /rys.236/. Przyrząd ten pozwala nam na pomiar oporności w zakresie od 1 do 10.000 Ω .

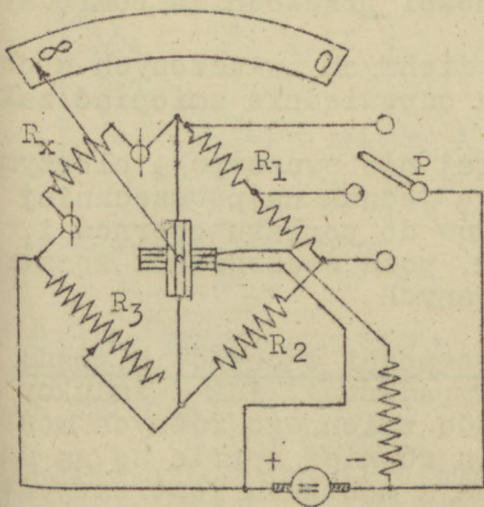
Część ruchoma przyrządu zastępuje w tym mostku galwanometr, a przełącznik P służy do zmiany zakresu, zmienia bowiem stosunek R_1/R_2

bki jest tak dobrana, że przy średniej szybkości obrotów korbki obroty twornika przekraczają 100 obr./min., tak że napięcie na zaciskach prądniczy odznacza się dużą stałością. Ruchomą część przyrządu stanowią dwie zwojnice L_1 i L_2 , ustawione prostopadle do siebie i nawinięte przeciwnie, to też gdy pole magnetyczne, powstające w zwojnicy L_1 , dąży do obrócenia zwojnic w lewo, pole magnetyczne w zwojnicy L_2 dąży do obrócenia ich w prawo. Do obu zwojnic przymocowana jest wskazówka S, poruszająca się po tarczy T, wyskalowanej bezpośrednio w omach. Po podłączeniu opornika badanego R_x do zacisków Z_1 i Z_2 i uruchomieniu prądniczy, natężenie pola magnetycznego w zwojnicy L_2 będzie zależało a więc i od oporności R_x . Wobec tego ruchoma

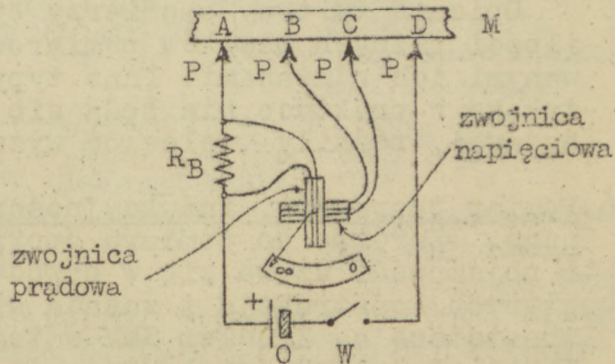
Poza tym przyrząd ten niczym się nie różni od zwykłego mostka Wheatstone'a. Oporność mierzonego opornika R_x obliczamy, jak w zwykłym mostku Wheatstone'a, z wzoru:

$$R_x = R_3 \cdot \frac{R_1}{R_2}.$$

Podobny mostek stosuje się również do pomiarów w zakresie od $10 \mu\Omega$ do 5Ω /rys.237/. Zaopatrzony on jest w dwie pary styków P. Gdy przy pomocy tego mostka chcemy np. zmierzyć oporność jakiegoś odcinka przewodnika pomiędzy punktami B i C, styki przyrządu przytykamy do przewodnika w punktach A, B, C i D. Po zamknięciu wyłącznika W, prąd z ogniwa O przepłynie częściowo przez bocznik R_B , a częściowo



Rys.236. Mostek elektrodynamiczny do pomiarów oporności w zakresie od 1 do 10.000 Ω .



Rys.237. Mostek elektrodynamiczny do pomiaru małych oporności.

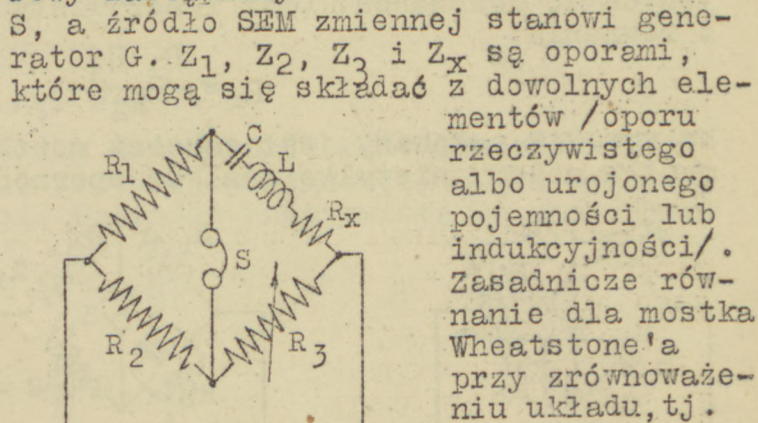
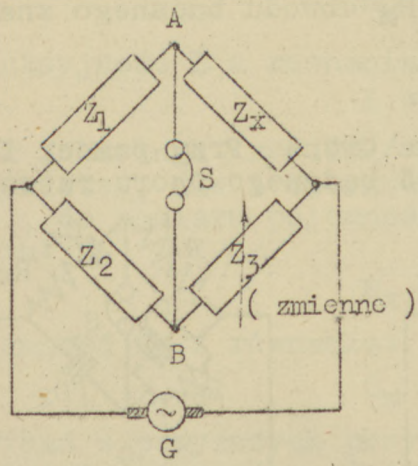
przez jedną ze zwojnic. Wynika stąd, że natężenie pola magnetycznego w tej zwojnicy będzie proporcjonalne do natężenia prądu, przepływającego w obwodzie I . Z tego też względu zwojnica ta nazywa się zwojnicą prądową. Natężenie pola magnetycznego w drugiej zwojnicy zależne jest również od przepływającego przez nią prądu, ponieważ jednak zwojnica nie jest bezpośrednio połączona z ogniwem, natężenie tego prądu będzie zależało od spadku napięcia pomiędzy punktami B i C V . Z tego też względu zwojnica ta nazywa się zwojnicą napięciową. Wychylenie zwojnic będzie więc w rezultacie zależało od ilorazu V/I , tj. od oporności przewodnika pomiędzy punktami B i C.

Przez odpowiedni dobór oporników zmiennych, włączonych w obwód zwojnic prądowej i napięciowej, można odpowiednio zmieniać zakres tego przyrządu.

Opisane tu typy omiarmyry bynajmniej nie wyczerpują olbrzymiej ilości różnych mostków pomiarowych, są jednak najpowszechniej używanymi ich odmianami. Inne typy mostków do pomiaru oporności, spotykane w praktyce, nie będą się jednak, poza szczegółami konstrukcyjnymi, różniły wielce od wyżej opisanych.

6. Pomiar oporności, indukcyjności i pojemności w obwodzie prądu zmiennego. Zarówno do pomiaru oporności wypadkowej, jak i indukcyjności i pojemności używa się w obwodach prądu zmiennego różnych mostków, których konstrukcja i zasada działania również oparte są na mostku Wheatstone'a. Źródłem SEM w tego rodzaju mostkach jest zazwyczaj jakiś generator /niekoniecznie prądnica/ o częstotliwości rzędu kilkuset \sim /sek. Zamiast galvanometru lub przyrządu elektrodynamicznego, używa się zwykle słuchawek, w których, w wypadku niezrównoważenia mostka, da się usłyszeć brzęk, ponieważ prąd o tego rzędu częstotliwości powoduje słyszalne drgania membrany słuchawek.

Schemat teoretyczny mostka do pomiaru oporności w obwodzie prądu zmiennego /niezależnie od elementów, wchodzących w skład układu/, podany jest na rys.238. Jak widzimy z tego rysunku, przyrząd pomiarowy zastąpiony tu został słuchawkami S, a źródło SEM zmiennej stanowi generator G. Z_1 , Z_2 , Z_3 i Z_x są oporami, które mogą się składać z dowolnych elementów /oporu rzeczywistego albo urojonego pojemności lub indukcyjności/. Zasadnicze równanie dla mostka Wheatstone'a przy zrównoważeniu układu, tj.



$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_x}{Z_3}$$

Rys. 238. Schemat teoretyczny mostka do pomiaru oporności zmiennej.

Rys. 239. Schemat mostka rezonansowego.

nadal zachowuje swą ważność.

Procedura przy dokonywaniu pomiaru jest bardzo prosta: po włączeniu w obwód mostka oporu badanego Z_x , dobieramy oporność Z_3 tak, że różnica potencjałów pomiędzy punktami A i B równa się zeru. Objawia się to zanikiem prądu w słuchawkach. Oporność Z_x możemy wówczas albo odczytać bezpośrednio na skali, w jaką opór Z_3 jest zaopatrzony, albo też obliczyć z odpowiedniego wzoru.

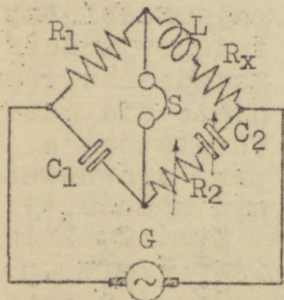
W zależności od różnych elementów /C, L lub R/ w poszczególnych gałęziach takiego mostka, opatrzone są one różnymi nazwami,

przeważnie pochodzącymi od nazwisk ich konstruktorów. Poniżej podane jest kilka najczęściej spotykanych odmian tego rodzaju mostków.

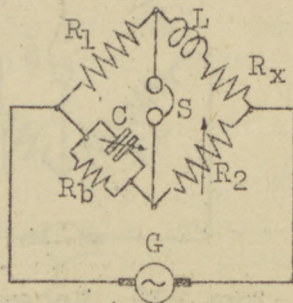
Na rys.239 mamy tzw. mostek rezonansowy, służący do pomiaru oporności rzeczywistej w obwodach równoległych lub szeregowych, dostosowanych do rezonansu. Opór rzeczywisty R_x obwodu badanego znajdujemy z równania:

$$R_x = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2}$$

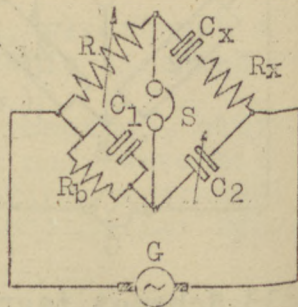
Na rys.240 pokazany jest schemat mostka Owena. Przy pomocy tego mostka możemy nie tylko znaleźć oporność badanego oporu rzeczywistego



Rys.240. Schemat mostka Owena.



Rys.241. Schemat mostka Maxwella.



Rys.242. Schemat mostka Scheringa.

go, ale i oporność urojoną indukcyjności, a zatem i współczynnik indukcyjności własnej badanej zwojnicy. Oporność rzeczywistą znajdujemy z równania:

$$R_x = \frac{C_1}{C_2} \cdot R_1,$$

a indukcyjność L z wzoru:

$$L = R_1 \cdot R_2 \cdot C_1.$$

Innym, zbliżonym do poprzedniego mostka układem jest schemat mostka Maxwella /rys.241/. Cporność rzeczywistą R_x obliczamy w tym mostku z wzoru:

$$R_x = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_b},$$

a indukcyjność L z równania:

$$L = R_1 \cdot R_2 \cdot C.$$

Mostek Scheringa /rys.242/ służy do pomiarów nietylko oporności rzeczywistej, ale i oporności urojonej pojemności, a, co za tym idzie, do pomiaru pojemności. Oporność rzeczywistą R_x znajdujemy z wzoru:

$$R_x = \frac{C_1}{C_2} \cdot R,$$

a pojemność C_x z równania:

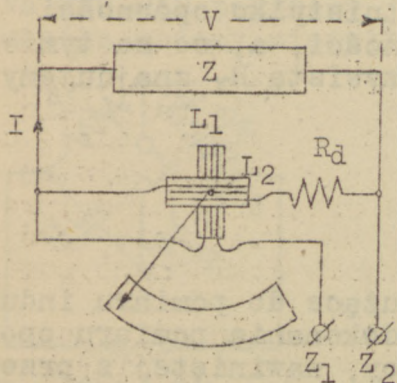
$$C_x = \frac{R_b}{R} \cdot C_2.$$

Jak widać z powyższych przykładów, mostki, służące do pomiaru indukcyjności i pojemności, dają zarazem możność dokonania pomiaru oporności rzeczywistej, ponieważ w każdej zwojnicy, nawiniętej z przewodnika nawet o bardzo dużym przekroju, występuje zawsze opór rzeczywisty, a, jeśli chodzi o kondensator, to nawet przy bardzo dobrym dielektryku zachodzą pewne straty na mocy, spowodowane prądem przesunięcia; zjawisko to utożsamia się z włączeniem /szeregowo lub równoległe/ pewnego oporu rzeczywistego w obwód kondensatora, którego oporność zmierzyć możemy jednym z wyżej wymienionych przykładowo mostków.

R o z d z i a ł 5.

Pomiar mocy, energii elektrycznej i częstotliwości.

1. Watomierz. Jako watomierz użyty być może każdy przyrząd elektrodynamiczny, odpowiednio włączony w obwód /rys. 243/. Jeżeli mamy zmierzyć moc, zużytą w jakimś oporze Z , który w tym wypadku nosi nazwę oporu obciążenia, przyrząd należy włączyć w obwód tak, aby przez



Rys. 243. Watomierz.

jedną ze zwojnic przepływał całkowity prąd, przepływający zarazem przez opór obciążenia Z . Z tego też względu zwojnica L_1 nosi nazwę zwojnic prądowej. Szeregowo ze zwojnicą L_2 połączony jest opornik dodatkowy R_d , zwojnica ta zatem działa, jak zwojnica ruchoma w woltomierzu, ponieważ natężenie jej pola magnetycznego jest proporcjonalne do spadku napięcia na oporze obciążenia Z . Zwojnica ta opatrzona jest nazwą zwojnic napięciowej. Ponieważ natężenie pola magnetycznego w zwojnicy L_1 jest proporcjonalne do natężenia prądu I , a w zwojnicy L_2 do spadku napięcia na oporze obciążenia \sqrt{V} , wychylenie części ruchomej przyrządu jest

proporcjonalne do iloczynu obu tych wartości, tj. do mocy $P = VI$. Jeżeli tarcza przyrządu jest wyskalowana w watach, można wartość mocy bezpośrednio na niej odczytać.

Zmianę zakresu watomierza można uzyskać albo przez zabocznikowanie zwojnic prądowej odpowiednim opornikiem, albo przez zmianę ilości zwojów w zwojnicy prądowej, która w tym celu zaopatrzona

być może w odpowiednie odczepy, lub wreszcie przez zmianę opornika dodatkowego R_d . Zwiększenie opornika dodatkowego R_d powoduje zmniejszenie natężenia prądu, przepływającego przez zwojnicę napięciową L_2 , a zatem zmniejszenie kąta wychylenia wskazówki przyrządu, co pociąga za sobą zwiększenie zakresu. Odwrotnie - zmniejszenie opornika dodatkowego powoduje zmniejszenie zakresu. W praktyce zwojnica napięciowa watomierza połączona być może z jedną z odmian uniwersalnego opornika dodatkowego z odpowiednimi odczepami i przełącznikiem, umożliwiającym szybką zmianę zakresu.

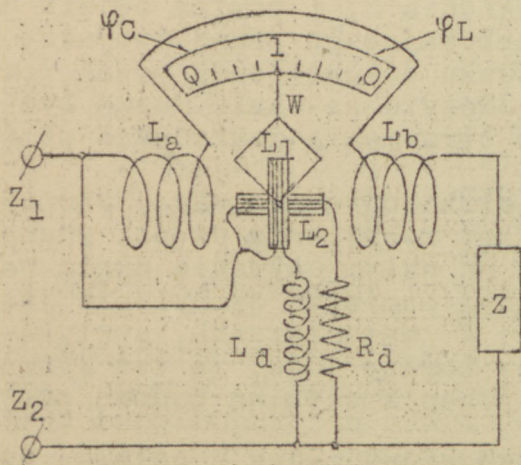
Dokładność watomierza zależy w znacznym stopniu od natężenia prądu, przepływającego przez zwojnicę napięciową L_2 . Im natężenie tego prądu będzie mniejsze, tym natężenie prądu, przepływającego przez zwojnicę prądową L_1 , będzie bardziej zbliżone do natężenia prądu, przepływającego przez opór obciążenia Z , i pomiar będzie dokładniejszy. Gdy natężenie prądu, przepływającego przez zwojnicę napięciową, jest względnie duże w stosunku do natężenia prądu, przepływającego przez opór obciążenia, do odczytu na skali muszą być wprowadzone odpowiednie poprawki celem otrzymania dokładnego pomiaru.

W laboratoryjnych watomierzach typu elektrodynamicznego, zaopatrzonych w lusterko i skalę świetlną, kąt wychylenia części ruchomej przyrządu jest zwykle mały, to też na całym zakresie skala watomierza jest równomierna, bo przy każdym pomiarze wychylenie jest grubszą proporcjonalne do mocy $P = VI$. W watomierzach, spotykanych w praktyce, wychylenia są niekiedy bardzo duże, to też równomierność skali zachować można jedynie przez specjalną budowę przyrządu.

Opór obciążenia na rys. 243 został oznaczony przez Z celowo, ponieważ watomierzem tego typu mierzyć można zużycie mocy nie tylko w oporze rzeczywistym w obwodzie prądu stałego, ale i w oporze, złożonym z różnorodnych elementów R, C i L w obwodzie prądu zmiennego.

Przy włączeniu tego typu watomierza w obwód prądu zmiennego, przez zwojnicę L_2 , szeregowo połączoną z dużym oporem rzeczywistym R_d , przepływa jakiś prąd o małym natężeniu, dajmy na to i , który jest wobec tego mniej więcej w fazie z napięciem przyłożonym. Im oporność R_d będzie większa, tym założenie nasze będzie bardziej ścisłe. Przez zwojnicę prądową L_1 przepływa natomiast prąd całkowity I , który opóźniony jest o jakiś kąt φ w stosunku do przyłożonego napięcia i jest prądem wypadkowym, złożonym z dwóch prądów składowych: $I \cos \varphi$ i $I \sin \varphi$ /por. Część VII, Rozdz. 3, par. 1 /.

Prąd składowy $I \sin \varphi$ przesunięty jest o 90° w fazie w stosunku do prądu, przepływającego przez zwojnicę napięciową, i wobec tego nie ma wpływu na jej wychylenie, natomiast drugi prąd składowy $I \cos \varphi$ jest w fazie z prądem, przepływającym przez zwojnicę L_2 ; wobec czego wychylenie wskazówki będzie proporcjonalne do iloczynu obu wartości, wpływających na wychylenie tej zwojnicy, a więc do $VI \cos \varphi = P$ - mocy w obwodzie prądu zmiennego.



Rys. 244. Schemat fazomierza.

2. Fazomierz. Fazomierz jest przyrządem, służącym do pomiaru kąta przesunięcia fazowego w obwodach prądu zmiennego. Schemat najpospolitszego typu fazomierza pokazany jest na rys. 244. Składa się on z dwuczłonowej zwojnicy nieruchomej L_a, L_b , która włączona jest w obwód szeregowo, tak że przepływa przez nią prąd całkowity, i z dwóch zwojnic jednakowych L_1 i L_2 , przymocowanych do siebie pod kątem 90° i obracających się

się na ośce, osadzonej w łożyskach kamiennych. Obie te zwojnice włączone są w obwód równoległe, przyczym jedna z nich połączona jest szeregowo ze zwojnicą L_d o dużym oporze indukcyjnym, a druga - z opornikiem dodatkowym R_d , którego oporność jest tak dobrana, że dla pewnej stałej częstotliwości zmian równa się ona oporności urojonej zwojnicy L_d . Zwojnica dwuczłonowa $L_a L_b$ nawinięta jest z grubego przewodnika celem zmniejszenia jej oporu rzeczywistego.

Prąd, przepływający przez zwojnicę L_2 jest w fazie /prawie/ z napięciem przyłożonym. Im większa jest oporność opornika dodatkowego R_d , tym założenie nasze jest bardziej ścisłe. Natomiast prąd, przepływający przez zwojnicę L_1 jest opóźniony o 90° w stosunku do przyłożonego napięcia ze względu na szeregowo połączoną z nią indukcyjność L_d .

Przy indukcyjnym charakterze oporu wypadkowego obciążenia Z /tj. $X_L > X_C$ /, prąd, przepływający przez nie, będzie opóźniony w stosunku do przyłożonego napięcia o jakiś kąt φ . Prąd ten jest prądem wypadkowym dwóch prądów składowych: $I \sin \varphi$, będącego w fazie z prądem, przepływającym przez zwojnicę L_1 , i $I \cos \varphi$, będącego w fazie z prądem, przepływającym przez zwojnicę L_2 . Wobec tego wzajemne działanie na siebie pól magnetycznych, powstających w obu zwojnicach, będzie przeciwne, i część ruchoma przyrządu wychyli się w prawo. To samo zajdzie przy pojemnościowym charakterze oporu wypadkowego obciążenia Z /tj. $X_C > X_L$ /, z tą różnicą, że strzałka przyrządu wychyli się w lewo. Przy oporowym charakterze obciążenia /tj. $X_L = X_C$ lub X_L i X_C w obwodzie nie występują/, pola magnetyczne w zwojnicach L_1 i L_2 się zniosą i strzałka przyrządu pozostanie w środku skali / $\cos \varphi = 1$ /. Jeśli tarcza przyrządu wyskalowana będzie bezpośrednio w wartościach cosinusa kąta przesunięcia fazowego, $\cos \varphi$ będziemy mogli bezpośrednio z niej odczytać.

Poza wyżej opisanym typem fazomierza istnieją jeszcze i inne.

Typ elektrodynamiczny firmy "Weston" odznacza się np. tym, że zwojnica L_d zastąpiona jest w nim kondensatorem, wobec czego skala przy rzędu jest odwrócona. W obwodach, w których płyną prądy o dużym natężeniu, używa się fazomierzy elektromagnetycznych, nie są one jednak zbyt dokładne ze względu na zachodzącą histerezę magnetyczną w ruchomych rdzeniach żelaznych.

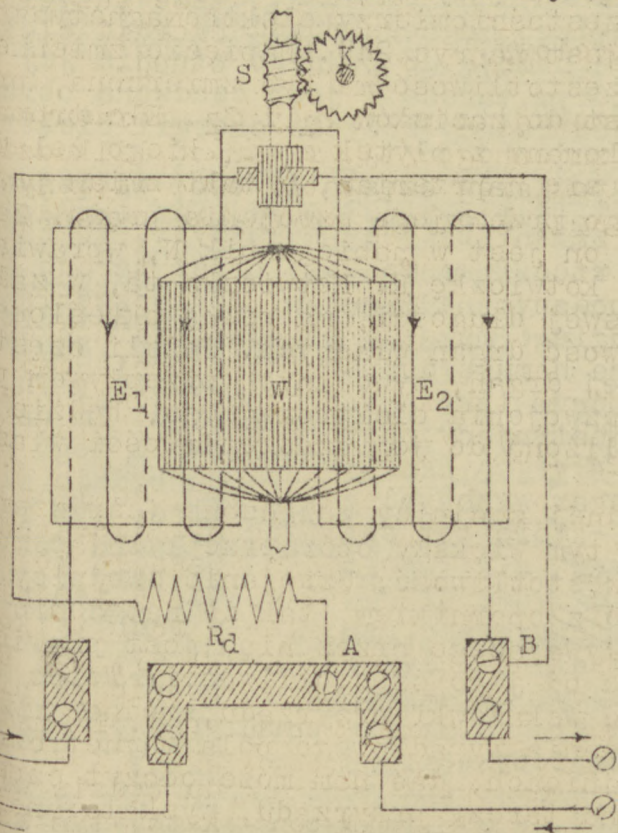
3. Liczniki elektryczne. Do pomiaru zużytej energii elektrycznej służą tzw. liczniki elektryczne, które ze względu na konstrukcję podzielone można na trzy zasadnicze typy:

1. Elektrolityczne.
2. Silnikowe.
3. Zegarowe.

Liczniki elektrolityczne mogą być stosowane tylko w obwodach prądu stałego lub, przy użyciu odpowiednich prostowników, również i w obwodach prądu zmiennego. Jako przykład licznika elektrolitycznego posłużyć może bardzo prosty w konstrukcji licznik Bastiana. Składa się on z wyskalowanej rurki, wypełnionej roztworem sody kaustycznej /wodorotlenek sodu - NaOH / . W rurkę tę wtopione są dwie elektrody niklowe. Gdy przez roztwór wodorotlenku sodu przepływa prąd elektryczny, który powoduje elektrolizę wody, tj. jej rozkład na wodór i tlen, poziom płynu w rurce się obniża. To obniżenie się poziomu cieczy w rurce proporcjonalne jest do przepływającego ładunku, to też rurka wyskalowana być może bezpośrednio w kWh. Po każdorazowym odczycie i odnotowaniu zużytej energii elektrycznej, trzeba dopełnić ciecz w rurce do poprzedniego poziomu.

Zaletami licznika elektrolitycznego są: taniść, prostota konstrukcji i dokładność, natomiast wadami - mała wytrzymałość mechaniczna /szkło/, konieczność częstego doglądu i uzupełniania elektrolitu oraz konieczność odnotowywania poprzednich odczytów.

Liczniki silnikowe dzielą się na kommutatorowe i rtęciowe. Naj-
bardziej rozpowszechniony typ licznika kommutatorowego pokazany jest na rys. 245.
Szybkość obrotów wirnika W zależy od dwóch czynników: 1. natężenia



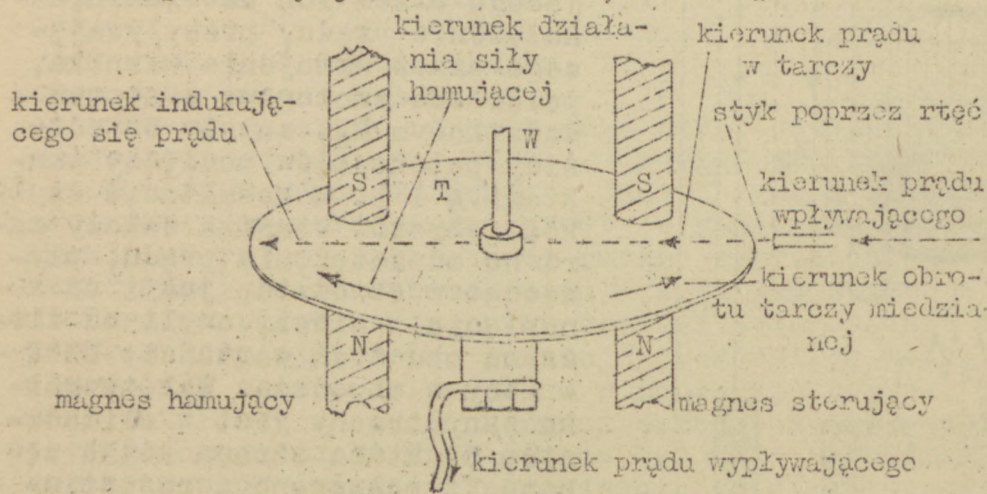
rys. 245. Najpospolitszy typ licznika kommutatorowego.

2. natężenia pola magnetycznego i 2. natężenia prądu, przepływającego przez uzwojenia wirnika. Natężenie pola magnetycznego pomiędzy elektromagnesami E_1 i E_2 zależy wprost proporcjonalnie do natężenia prądu, przepływającego przez ich uzwojenia, a natężenie prądu, przepływającego przez uzwojenie wirnika, połączone szeregowo z oporem dodatkowym R_d , zależy od różnicy potencjałów pomiędzy punktami A i B. W rezultacie szybkość obrotów wirnika zależy zarówno od natężenia prądu, płynącego w obwodzie, jak i od napięcia w sieci, czyli od iloczynu obu tych wartości: $UI=P$ - mocy w obwodzie. Wał twornika zaopatrzony jest w ślimacznicę S, która obraca kółko zębate K, połączone z rejestrującym mechanizmem zegarowym.

Licznik rtęciowy, którego schemat pokazany jest na rys. 246, składa się z dwóch par magnesów stałych oraz z tarczy

z amalgamatu miedzi /T/. Całość zamknięta jest w naczyniu, wypełnionym rtęcią. Prąd, płynący przez rtęć i dośrodkowo przez tarczę T, powoduje jej obrót w kierunku, podanym na rysunku. Jednocześnie ruch tej płyty pomiędzy biegunami drugiego magnesu powoduje zaindukowanie się w niej prądów wirowych, które hamują do pewnego stopnia jej obrót. Nagwintowany wał W, na którym tarcza T jest osadzona obraca zarazem odpowiedni mechanizm rejestrujący zużycie energii elektrycznej.

Zasada działania liczników zegarowych polega na tym, że licznik taki zaopatrzony jest w wahadło, które porusza mechanizm zegarowy.



Wahadło to wprawione zostaje w ruch tylko wtedy, gdy w obwodzie płynie prąd. Im natężenie tego prądu będzie większe, tym ruch wahadła jest szybszy, rejestrując nam przy pomocy mechanizmu zegarowego większe zużycie energii elektrycznej.

Rys.246. Licznik rtęciowy.

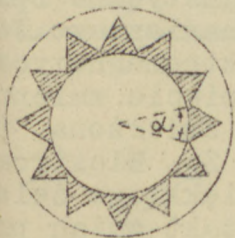
4. Częstościomierze. Częstościomierze są to przyrządy do mierzenia częstotliwości przemysłowych prądu zmiennego /tj. rzędu od kilkudziesięciu do kilkuset ~/sek./. Do pomiarów częstotliwości większych służą przyrządy, zwane falomierzami, których omówienie wkracza już

dziedzinę radiotechniki.

Istnieje wiele typów częstotliwościomierzy, z których najpopularniejszymi są trzy następujące odmiany:

1. Prądnicowy.
2. Elektrodynamiczny.
3. Elektromagnetyczny.

Częstotliwościomierz prądnicowy składa się z przetwornicy, której rozwinięcia wirnika w silniku włączone są do sieci, w której chcemy zmierzyć częstotliwość zmian prądu. Jak wiemy, SEM prądnicowy w przetwornicy zależy m.in. od szybkości obrotów, a więc od częstotliwości zmian prądu. Wskaźnik przyrządu stanowi zatem albo wol-

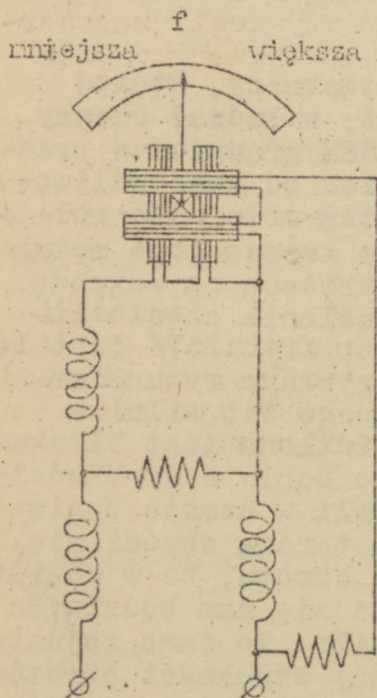


tomierz, włączony do zacisków prądnicowy, przyczym tarczę jego można wyskalować bezpośrednio w okresach na sekundę, albo też można użyć dla określenia częstotliwości stroboskopu. Stroboskop /rys.247/ jest to tarcza, pokryta jakimś symetrycznym rysunkiem i osadzona na wale obracającego się silnika lub prądnicowy. Tarcza ta oświetlona jest błyskami światła, następującymi po sobie z szybkością np. 12 razy na sekundę. Jeżeli w czasie pomiędzy poszczególnymi błyskami tarcza obróci się o kąt α , nie zauważymy jej obrotu, bo w chwili ukazania się światła wydawać się nam będzie, że jej położenie się nie zmieniło. To samo zajdzie, oczywiście, przy wielokrotnej szybkości obrotów,

rys.247. Stroboskop. więc gdy tarcza obrócona zostanie o kąt 2α , 3α itd. w przerwie pomiędzy błyskami światła. W ten sposób, przez dobór rysunku na tarczy i szybkości błysków światła można zbadać częstotliwość zmian prądu.

Metoda elektrodynamiczna polega na użyciu przyrządu elektrodyna-

micznego, w którym uzwojenie jednej zwojnicy połączone jest szeregowo z zwojnicą drugą, stawiającą tym większy opór przepływającemu prądowi, im większa jest jego częstotliwość. Uzwojenie zwojnicy drugiej połączone jest szeregowo z opornikiem, tak że natężenie prądu, przepływającego przez nią, jest prawie niezależne od jego częstotliwości. Wobec tego wychylenie wskazówki przyrządu, będące wynikiem natężenia wypadkowego pola magnetycznego w obu zwojnicach, dać nam może odczyt częstotliwości na tarczy przyrządu, wyskalowanej w \sim/sek .

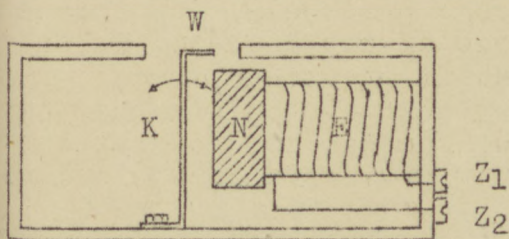


Rys.248. Schemat częstotliciomierza elektrodynamicznego f-my Weston.

Na rys.248 pokazany jest schemat najpopularniejszego typu tego rodzaju częstotliciomierza /wyk. przez F-mę Weston/.

Częstotliciomierze elektromagnetyczne oparte są na zasadzie rezonansu mechanicznego. Jeden z typów częstotliciomierzy elektromagnetycznych pokazany jest na rys.249. Napięcie zmienne, którego częstotliwość ma być zmierzona, przyłożone jest do zacisków Z_1 i Z_2 . Elektromagnes E , wykonany z płytek z miękkiego żelaza, magnesuje się naprzemiennie, w takt zmian przepływającego przez jego uzwojenia prądu. Zauważony on jest w nabiegunnie N , wprawiając w drgania kotwiczkę K . Kotwiczka ta, w zależności od swej długości, ma pewną określoną częstotliwość drgań własnych. Jeżeli częstotliwość jej drgań, wywołanych przepływem prądu przez uzwojenia elektromagnesu, będzie bardzo zbliżona do jej częstotliwości własnej

drgań, kotwiczka zostanie bardzo rozkołysana, ponieważ zachodzi tu zjawisko rezonansu elektro-mechanicznego. O ile przyrząd zaopatrzone zostanie w szereg kotwiczek o różnej długości, a zatem o różnej częstotliwości drgań własnych, przez wziernik W będziemy mogli zaobserwować, która z kotwiczek została najbardziej rozkołysana. Napis nad wziernikiem, podający częstotliwość drgań własnych każdej z kotwiczek, pozwoli nam na zorientowanie się, jaka jest częstotliwość przepływającego prądu przez uzwojenia elektromagnesu.



rys. 249. Częstościomierz elektro-magnetyczny, oparty na zasadzie rezonansu mechanicznego.

Zaznaczyć należy, że częstotliwość ta będzie odpowiadała dokładnie połowie częstotliwości własnej drgań kotwiczki, która zostanie najbardziej rozkołysana.

-----0-----

D O D A T E K.

TABLICE FIZYCZNE I MATEMATYCZNE.

Tablica II opracowana została na podstawie danych, zawartych w pracy "The Outline of Wireless", R.Stranger, George Newnes, Ltd., London.

Reszta tablic skompilowana została na podstawie:

1. "Physical Tables", Smithsonian Institution, Washington, U.S.A.
2. K.Henney - "Radio Engineering Handbook",
MC Graw-Hill, New-York.

TABLICA I.
BUDOWA ATOMU.

Masa atomu wodoru	$1,662 \times 10^{-24} \text{ g.}$
Ilość cząsteczek, zawartych w 1g. wodoru	$3,031 \times 10^{28} \text{ g.}$
Ilość cząsteczek, zawartych w 1 cm ³ . wodoru w temperaturze 0°C i przy ciśnieniu 760 mm.	$2,705 \times 10^{19}$
Promień cząsteczki wodoru	ok. 10^{-8} cm.
Promień atomu wodoru	$0,52 \times 10^{-8} \text{ cm.}$
Promień atomu tlenu	$0,65 \times 10^{-8} \text{ cm.}$
Promień atomu miedzi	$1,37 \times 10^{-8} \text{ cm.}$
Promień atomu ołowiu	$1,90 \times 10^{-8} \text{ cm.}$

Elektron.

$$\text{Masa elektronu} = 9,01 \times 10^{-28} \text{ g.} = \frac{\text{masa atomu wodoru.}}{1845}$$

$$\text{Promień elektronu} = 2 \times 10^{-13} \text{ cm.} = \frac{\text{promień atomu.}}{26000}$$

Proton.

$$\text{Promień} = \frac{\text{promień elektronu.}}{2000}$$

TABELICA II.

PIERWIASTKI CHEMICZNE.

Liczba atomowa	Nazwa pierwiastka	Symbol	Masa atomowa	Ilość elektronów wirujących	Ilość elektronów związanych w jądrze	Ilość protonów	Cechy charakterystyczne
1	Wodór	H	1	1	0	1	Bezbarwny i bezwonne gaz.
2	Hel	He	4	2	2	4	Gaz szlachetny, bezbarwny i bezwonne.
3	Lit	Li	6,94	3	4	7	Najlżejszy, miękki, jasno-srebrny metal. Temperatura topnienia: 180° C.
4	Beryl	Be	9,1	4	5	9	Twardy, jasno-szary metal. Temperatura topnienia 1278° C.
5	Bor	B	10,9	5	6	11	Ciało stałe o szarym kolorze.
6	Węgiel	C	12	6	6	12	Allotropowymi odmianami węgla są diament i grafit.
7	Azot	N	14	7	7	14	Bezbarwny i bezwonne gaz.
8	Tlen	O	16	8	8	16	Bezbarwny i bezwonne gaz.
9	Fluor	F	19	9	10	19	Jasno-żółty gaz o ostrym zapachu.

10	Neon	Ne	20,2	10	10	20	Szlachetny, bezbarwny i bezwonny gaz
11	Sód	Na	23	11	12	23	Srebrno-żółty, miękki metal. Temperatura topnienia: 96,5°C.
12	Magnez	Mg	24,32	12	12	24	Bardzo lekki, jasno-szary metal. Temperatura topnienia: 632,7°C.
13	Glin	Al	27,1	13	14	27	Jasno-srebrny metal. Temperatura topnienia: 626°C.
14	Krzem	Si	28,3	14	14	28	Ciało stałe, istniejące w dwóch postaciach: krystalicznej i niekrystalicznej.
15	Fosfor	P	31	15	16	31	Ciało stałe, istniejące w dwóch postaciach: 1. żółtego ciała stałego, silnie trującego i 2. ciemno-czerwonego, nietrującego proszku.
16	Siarka	S	32	16	16	32	Żółte, krystaliczne ciało stałe.
17	Chlor	Cl	35,46	17	18	35	Trujący, żółto-zielony gaz.
18	Argon	A	39,9	18	22	40	Bezbarwny i bezwonny gaz szlachetny.
19	Potas	K	39,1	19	20	39	Miękki metal o kolorze srebrno-lila. Temperatura topnienia 62,5°C.
20	Wapń	Ca	40,07	20	20	40	Twardy metal, podobny z wyglądu do cynku. Temperatura topnienia: 800°C.

21	Skand	Sc	45,1	21	24	45	Skandu w czystej postaci nie udało się jeszcze utrzymać, chociaż własności jego związków są dobrze znane.
22	Tytan	Ti	48,1	22	26	48	Metal, twardszy od kwarcu. Z wyglądu przypomina stal. Temperatura topnienia: około 1825°C.
23	Wanad	V	51	23	28	51	Srebrno-biały metal, kruchy jak szkło i podobny z wyglądu do lane-go żelaza. Temperatura topnienia: około 1710°C.
24	Chrom	Cr	52	24	28	52	Twardy, stalowo-szary metal. Temperatura topnienia: około 2000°C.
25	Mangan	Mn	54,93	25	30	55	Twardy, kruchy metal, podobny do żelaza. Temperatura topnienia: 1230°C.
26	Żelazo	Fe	55,84	26	30	56	Znany metal o własnościach ferromagnetycznych. Temperatura topnienia: 1530°C.
27	Kobalt	Co	58,97	27	32	59	Jasno-srebrny metal. Temperatura topnienia: 1530°C.
28	Nikiel	Ni	58,7	28	31	59	Jasno-szary, kowalny metal, o własnościach ferromagnetycznych. Temperatura topnienia: 1400°C.
29	Miedź	Cu	63,57	29	34	62	Znany, kowalny metal. Jest dobrym przewodnikiem prądu elektrycznego. Temperatura topnienia: 1000°C.

30	Cynk	Zn	65,37	30	35	65	Znany metal. Temperatura topnienia: 415°C.
31	Gal	Ga	70,1	31	39	70	Szarawo-biały, bardzo twardy, krystaliczny metal. Temperatura topnienia: 32°C.
32	German	Ge	72,5	32	40	72	Rzadko spotykany, szary, krystaliczny metal. Temperatura topnienia: 900°C.
33	Arsen	As	74,96	33	42	75	Stalowo-szare ciało o metalicznym połysku i właściwościach silnie trujących. Temperatura topnienia: 446°C.
34	Selen	Se	79,2	34	45	79	Istnieje w trzech postaciach: 1. płynnej, 2. czerwonych kryształków i 3. w postaci szarej, krystalicznej czyli metalicznej. Selen w postaci metalicznej jest przewodnikiem prądu elektrycznego. Przewodność właściwa selenu zwiększa się w miarę wzrostu natężenia padającego nań światła. W ciemności selen nie przewodzi prądu elektrycznego. Z tego względu selen używany jest często w aparatach do reprodukcji filmów dźwiękowych.
35	Brom	Br	79,92	35	45	80	Ciało płynne o czerwonym kolorze. Temperatura wrzenia: 59°C.

36	Krypton	Kr	82,92	36	47	83	Bezbarwny i bezwonnny, szlachetny gaz.
37	Rubid	Rb	85,45	37	48	85	Jasno-srebrny metal. Temperatura topnienia: 38,5°C.
38	Stront	Sn	87,63	38	50	88	Kowalny, jasno-srebrny metal. Temperatura topnienia: 800°C.
39	Ytr	Yt lub Y	89,3	39	50	89	Żelazawo-szary metal, wchodzący w skład tzw. "ziemi rzadkich". Temperatura topnienia: 1490°C.
40	Cyrkon	Zr lub Z	90,6	40	50	90	Żelazawo-szary proszek metaliczny. Kryształy jego, podobne do kryształów antymonu, są bardzo twarde i kruche.
41	Niob	Nb lub Cb	93,5	41	52	93	Pierwiastek ten znany jest także pod nazwą Kolumba. Jest to bardzo kowalny metal. Temperatura topnienia: 1950°C.
42	Molibden	Mo	96	42	54	96	Jasno-srebrny, kowalny metal. Temperatura topnienia: 2460°C.
43	Mazurium	Ma	-	43	-	-	Pierwiastka tego nie udało się jeszcze otrzymać w czystej postaci.
44	Ruten	Ru	101,7	44	58	102	Białawy, twardey metal, podobny do platyny. Temperatura topnienia: 2450°C.
45	Rod	Rh	102,9	45	58	103	Twardy, kowalny, białawy metal. Temperatura topnienia: 1970°C.

46	Pallad	Pd	106,7	46	60	106	Metal o srebrnym kolorze, używany do lutowania platyny. Temperatura topnienia: 1530°C.
47	Srebro	Ag	107,88	47	61	108	Znany, bardzo kowalny metal. Temperatura topnienia: 1000°C.
48	Kadm	Cd	112,4	48	64	112	Białawo-niebieskawy metal, podobny z wyglądu do cynku. Temperatura topnienia: 310°C.
49	Ind	In	114,8	49	66	115	Miękki, kowalny metal. Temperatura topnienia: 155°C.
50	Cyna	Sn	118,7	50	69	119	Znany metal. Temperatura topnienia: 230°C.
51	Antymon	Sb	120,2	51	69	120	Jasno-srebrny, bardzo kruchy, krystaliczny metal. Temperatura topnienia: 432°C.
52	Tellur	Tc	127,5	52	75	127	Kruchy, jasno-srebrny metal. Temperatura topnienia: 452°C.
53	Jod	J lub I	126,92	53	74	127	Ciemno-krystaliczne ciało stałe. Temperatura topnienia: 1142°C.
54	Ksenon	Xa	130,4	54	76	130	Bezbarwny i bezwonny gaz szlachetny.
55	Céz	Cs	132,81	55	78	133	Jasno-srebrny metal. Temperatura topnienia: 26°C. Jest to pierwszy metal odkryty przy pomocy spektroskopu.

56	Bar	Ba	137,37	56	81	137	Bardzo rzadki metal.
57	Lantan	La	139	57	82	139	Metal, wchodzący w skład tzw. "ziemi rzadkich". Bardzo kowalny, ale nie ciągliwy. Z pośród metali, stenowiących "ziemie rzadkie", najłatwiej wiąże się z innymi pierwiastkami. Temperatura topnienia: 810°C.
58	Cer	Ce	140,25	58	82	140	Metal, wchodzący w skład "ziemi rzadkich". Podobny z wyglądu do żelaza, jest jednak bardzo kowalny i ciągliwy. Uderzony kawałkiem stali, daje jasne iskry. Temperatura topnienia: 635°C.
59	Prazeodym	Pr	140,9	59	82	141	Metal, wchodzący w skład "ziemi rzadkich", którego nie udało się dotąd jeszcze wydzielić w czystej postaci.
60	Neodym	Nd	144,3	60	84	144	Żółty metal, wchodzący w skład "ziemi rzadkich". Temperatura topnienia: około 840°C.
61	Illiniun	Il	-	61	-	-	Pierwiastka tego nie udało się jeszcze wydzielić w czystej postaci.
62	Samar	Sm	150,4	62	88	150	Żółty metal, wchodzący w skład "ziemi rzadkich". Temperatura topnienia: około 1350°C.

63	Europ	Eu	152	63	89	152	Metale, wchodzące w skład "ziemi rzadkich". Dotychczas nie udało się ich jeszcze wydzielić.
64	Gadolin	Gd	157,3	64	93	157	
65	Terb	Tb	159,2	65	94	159	
66	Dysproz	Dy	162,5	66	96	162	
67	Holm	Ho	163,5	67	96	163	
68	Erb	Er	167,7	68	100	168	Metal "ziemi rzadkich" w postaci ciemno-szarego proszku.
69	Tul	T lub Tm	168,5	69	99	168	Metale "ziemi rzadkich". Dotychczas nie udało się ich jeszcze wydzielić.
70	Yterb	Yb	173,5	70	103	173	
71	Kasjop	Cp lub Lu	175	71	104	175	
72	Hafn	Hf lub Ha	178,6	72	106	178	Dotychczas nie udało się jeszcze wydzielić tego pierwiastka.
73	Tantal	Ta	181,5	73	108	181	Jasno-srebrny, bardzo ciągliwy metal. Przy obróbce młotem twar- dnieje do tego stopnia, że nie można w nim wywiercić otworu nawet przy pomocy wiertła dia- mentowego. Temperatura topnienia: 2250°C.
74	Wolfram /w kra- jach an- glosas- kich - -Tungsten/	W lub Wo	184	74	110	184	Krystaliczny metal. Daje się wywalcować w bardzo cienki drucik. Temperatura topnienia: 3400°C.

75	Ren	-	-	75	-	-	Dotychczas niewydzielony.
76	Osm	Os	190,9	76	115	191	Niebieskawo-szary metal.
77	Iryd	Ir	193,1	77	116	193	Bardzo kruchy metal. Stop tego metalu z platyną jest bardzo twardy.
78	Platyna	Pt	195,2	78	117	195	Znany, drogiocenny metal, bardzo kowalny i ciągliwy. Jest on dobrym przewodnikiem prądu elektrycznego. Temperatura topnienia: 1755°C.
79	Złoto	Au	197,2	79	118	197	Znany, drogiocenny, bardzo miękki i najbardziej kowalny z pośród wszystkich metali. Temperatura topnienia: 1066°C.
80	Rtęć	Hg	200,6	80	120	200	W temperaturze pokojowej jest to płynny metal. W miarę ogrzewania rozszerza się bardzo równomiernie. Temperatura wrzenia: 360°C.
81	Tal	Tl	204	81	123	204	Jasno-niebieski, bardzo miękki metal. Temperatura topnienia: 290°C.
82	Ołów	Pb	207,2	82	125	207	Znany metal. Temperatura topnienia: 327,7°C.
83	Bizmut	Bi	208	83	125	208	Jasno-czerwony metal o budowie krystalicznej, bardzo kruchy. Podobnie jak lód, rozszerza się przy zestalaniu się. Jest on najgorszym przewodnikiem ciepła. Temperatura topnienia: 268,3°C.

84	Polon	Po lub Pi	210	84	126	210	Dotychczas niewydzielony pierwiastek radioaktywny.
85	-	-	-	85	-	-	Nieznany.
86	Radon	Rn	-	86	-	-	Bezbarwny i bezwonny gaz szlachetny.
87	-	-	-	87	-	-	Istnienie tego pierwiastka zostało stwierdzone, ale jest on jeszcze nieznany.
88	Rad	Ra	226	88	138	226	Metal ten nie został jeszcze wydzielony w czystej postaci. W praktyce jako elementu radioaktywnego używa się soli radu.
89	Aktyln	Ac	-	89	-	-	Niewydzielony dotychczas pierwiastek radioaktywny.
90	Tor	Th	232,15	90	142	232	Szary metal o budowie krystalicznej. Temperatura topnienia: około 1450°C.
91	Protoaktyln	Pa	-	91	-	-	Niewydzielony dotychczas pierwiastek radioaktywny.
92	Uran	U	238,2	92	146	238	Jasny metal, nieco twardy, lecz kowalny. Jest on najcięższy z pośród znanych metali.

TABLICA III.

OPORNOSC WIASCIWA NIEKTORYCH CIAŁ.

C i a ł o	ρ w $\mu\Omega/\text{cm}^3$	α / Współczynnik ciepłoty opornosci/
<u>Pierwiastki:</u>		
Srebro w temp. 18°C .	1,629	0,0038
Miedź w temp. 20°C .	1,77	0,0038
Wolfram w temp. 20°C .	5,51	0,0045
Platyna w temp. 20°C .	10	0,003
Żelazo miękkie w temp. 20°C .	10	0,005
Ołów w temp. 0°C .	19,85	0,00387
Rtęć w temp. 0°C .	94,07	0,00089
Węgiel	$0,004 \times 10^6$	-0,0003
<u>Stopy:</u>		
Fosforo-bronz /92,5% Cu, 7% Cyny, 0,5% P/	5 - 10	0,0007
Manganin /84% Cu, 12% Mn, 4% Ni/	43,5	0,000025
Konstantan /60% Cu, 40% Ni/	49	od - 0,00004 do +0,00001
Chromonikielina /60% Ni, 15% Cr, 25% Fe/	100	0,0004

TABLICA IV.

STAŁE DIELEKTRYCZNE I WYTRZYMAŁOŚĆ NA PRZEBICIE NIEKTÓRYCH CIAŁ.

C i a ł o	Stała dielektryczna	Wytrzymałość na przebicie w V/mm /dane przybliżone/
Woda destylowana	80	-
Lód /w temp. -7.5°C./	71	-
Marmur	od 9.3 do 11.6	-
Mika	od 5 do 8	od 17000 do 60000
Porcelana	od 4.4 do 7	16300
Kalit	6.2	-
Celuloid	6.2	-
Fibra	od 2.5 do 7.6	-
Bursztyn	od 5.4 do 5.8	-
Szkło	od 3.7 do 10	od 8000 do 28500
Żywica	od 3.3 do 4.7	-
Szellak	od 2.75 do 6	10000
Freszpan	3	od 6000 do 15000
Guma	od 2.12 do 5	od 18000 do 40000
Ebonit	od 2 do 3.2	od 30000 do 50000
Olej mineralny	2.7	od 6000 do 8000
Trolitul	2.6	-
Wosk	2.5	-
Parafina	od 2 do 2.3	-
Olej izolacyjny	2.217	od 6000 do 8000
Terpentyna	2.2	-
Wazelina	2	-
Papier	1.5	-

TABLICA V.

RÓWNOWAŹNIKI ELEKTROCHEMICZNE NIEKTÓRYCH PIERWIASTKÓW.

Pierwiastek	Masa atomowa.	Równoważnik elektrochemiczny
Wodór	1	0.00001044
Tlen	16	0.00008293
Glin / Aluminium / Sód	27.01	0.0000936
Nikiel	23	0.0002384
Miedź	58.7	0.0003041
Cynk	63.57	0.0003296
Brom	65.37	0.0003387
Srebro	79.92	0.0008284
	107.88	0.0011183

TABLICA VI.

SEM I OPORNOŚĆ WEWNĘTRZNA NIEKTÓRYCH OGNIW.

Rodzaj ogniwa	Elektrolit	SEM w woltach	Oporność wewnętrzna w Ω .
Akumulator kwasowy	H_2SO_4 o c.wł. 1,100	2,2	/zależna od stanu i pojemności akumulatora/.
Daniell'a	20%-owy roztwór wodny H_2SO_4 i 17%-owy roztwór wodny $CuSO_4$	1,06	od 2 do 8
Daniell'a	7,7%-owy roztwór wodny H_2SO_4 i 17%-owy roztwór wodny $CuSO_4$	1,09	
Leclanche	Salmiak	1,46	od 0,007 do 0,5
Westona	Roztwór nasycony $CdSO_4$ oraz pasta, składająca się z Hg_2SO_4 i $CdSO_4$	1,0183 w temp. 20°C	-

TABLICA VII.

PRZENIKALNOŚĆ MAGNETYCZNA / μ / ŻELAZA I STALI.

Rodzaj żelaza lub stali	μ_{max} .
Żelazo elektrolityczne	1850
Staliwo /stal. lana/	3550 x)
Staliwo hartowane	14800 x)
Stal utwardzona	110 x)
Żeliwo	240 x)
Żeliwo hartowane	600 x)
Stal wolframowa	105 x)
Stal chromowa	94 x)

x) Powyższe wartości są tylko przykładowe i dotyczą żeliwa, względnie staliwa, względnie stali o ściśle określonej zawartości węgla, krzemu /dla żeliwa/, chromu, względnie wolframu /dla odnośnych gatunków stali/.

TABLICA VIII.

ZAMIANA UŁAMKÓW ZWYCZAJNYCH NA DZIESIĘTNE.

1/64	0.015625	17/64	0.265625	33/64	0.515625	49/64	0.765625
1/32	0.03125	9/32	0.28125	17/32	0.53125	25/32	0.78125
3/64	0.046875	19/64	0.296875	35/64	0.546875	51/64	0.796875
1/16	0.0625	5/16	0.3125	9/16	0.5625	13/16	0.8125
5/64	0.078125	21/64	0.328125	37/64	0.578125	53/64	0.828125
3/32	0.09375	11/32	0.34375	19/32	0.59375	27/32	0.84375
7/64	0.109375	23/64	0.359375	39/64	0.609375	55/64	0.859375
1/8	0.125	3/8	0.375	5/8	0.625	7/8	0.875
9/64	0.140625	25/64	0.390625	41/64	0.640625	57/64	0.890625
5/32	0.15625	13/32	0.40625	21/32	0.65625	29/32	0.90625
11/64	0.171875	27/64	0.421875	43/64	0.671875	59/64	0.921875
13/16	0.1875	7/16	0.4375	11/16	0.6875	15/16	0.9375
13/64	0.203125	29/64	0.453125	45/64	0.703125	61/64	0.953125
7/32	0.21875	15/32	0.46875	23/32	0.71875	31/32	0.96875
15/64	0.234375	31/64	0.484375	47/64	0.734375	63/64	0.984375
1/4	0.25	1/2	0.5	3/4	0.75		

TABLICA IX.

POTEGI I PIERWIASTKI LICZBY $\pi \approx 3,142$.

n	$\frac{1}{n}$	n^2	n^3	\sqrt{n}	$\frac{1}{\sqrt{n}}$	$3\sqrt{n}$	$\frac{1}{3\sqrt{n}}$
$\pi \approx 3,142$	0,318	9,87	31,006	1,772	0,564	1,465	0,683
$2\pi \approx 6,283$	0,159	39,478	248,05	2,507	0,399	1,845	0,542
$\frac{\pi}{2} \approx 1,571$	0,637	2,467	3,878	1,253	0,798	1,162	0,86
$\frac{\pi}{3} \approx 1,047$	0,955	1,097	1,148	1,023	0,977	1,016	0,985
$\frac{4}{3}\pi \approx 4,189$	0,239	17,546	73,496	2,047	0,489	1,612	0,622
$\frac{\pi}{4} \approx 0,785$	1,274	0,617	0,484	0,886	1,128	0,923	1,084
$\frac{\pi}{6} \approx 0,524$	1,91	0,274	0,144	0,724	1,382	0,806	1,241
$\pi^2 \approx 9,87$	0,101	97,409	961,39	3,142	0,318	2,145	0,466
$\pi^3 \approx 31,006$	0,032	961,39	29809,91	5,568	1,796	3,142	0,318
$\frac{\pi}{3^2} \approx 0,098$	10,186	0,0095	0,001	0,313	3,192	0,461	2,168

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25

TABLICA X.

KWADRATY I PIERWIASTKI KWADRATOWE LICZB CAŁKOWITYCH od 1 do 100.

n	n ²	\sqrt{n}	n	n ²	\sqrt{n}	n	n ²	\sqrt{n}	n	n ²	\sqrt{n}
1	1	1.000	26	676	5.099	51	2601	7.141	76	5776	8.718
2	4	1.414	27	729	5.196	52	2704	7.211	77	5929	8.775
3	9	1.732	28	784	5.292	53	2809	7.280	78	6084	8.832
4	16	2.000	29	841	5.385	54	2916	7.348	79	6241	8.888
5	25	2.236	30	900	5.477	55	3025	7.416	80	6400	8.944
6	36	2.449	31	961	5.568	56	3136	7.483	81	6561	8.900
7	49	2.646	32	1024	5.657	57	3249	7.550	82	6724	8.955
8	64	2.828	33	1089	5.745	58	3364	7.616	83	6889	8.910
9	81	3.000	34	1156	5.831	59	3481	7.681	84	7056	8.965
10	100	3.162	35	1225	5.916	60	3600	7.746	85	7225	8.920
11	121	3.317	36	1296	6.000	61	3721	7.810	86	7396	8.974
12	144	3.464	37	1369	6.083	62	3844	7.874	87	7569	8.927
13	169	3.606	38	1444	6.164	63	3969	7.937	88	7744	8.981
14	196	3.742	39	1521	6.245	64	4096	8.000	89	7921	8.934
15	225	3.873	40	1600	6.325	65	4225	8.062	90	8100	8.987
16	256	4.000	41	1681	6.403	66	4356	8.124	91	8281	8.939
17	289	4.123	42	1764	6.481	67	4489	8.185	92	8464	8.992
18	324	4.243	43	1849	6.557	68	4624	8.246	93	8649	8.944
19	361	4.359	44	1936	6.633	69	4761	8.307	94	8836	8.995
20	400	4.472	45	2025	6.708	70	4900	8.367	95	9025	8.947
21	441	4.583	46	2116	6.782	71	5041	8.426	96	9216	8.998
22	484	4.690	47	2209	6.856	72	5184	8.485	97	9409	8.949
23	529	4.796	48	2304	6.928	73	5329	8.544	98	9604	8.999
24	576	4.899	49	2401	7.000	74	5476	8.602	99	9801	8.950
25	625	5.000	50	2500	7.071	75	5625	8.660	100	10000	10.000

ТАБЛИЦА XI.

ФУНКЦИИ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИЕ.

Кат В stopniach	Sinus	Cosinus	Tangens	Cotangens	Кат В stopniach
0°	0	1	0	∞	90°
1	0.0175	0.9998	0.0175	57.2900	89
2	0.0349	0.9994	0.0349	28.6365	88
3	0.0523	0.9986	0.0524	19.0811	87
4	0.0698	0.9976	0.0699	14.3006	86
5	0.0872	0.9962	0.0875	11.4301	85
6	0.1045	0.9945	0.1051	9.5144	84
7	0.1219	0.9925	0.1228	8.1443	83
8	0.1392	0.9903	0.1405	7.1154	82
9	0.1564	0.9877	0.1584	6.3138	81
10	0.1735	0.9848	0.1763	5.6713	80
11	0.1908	0.9816	0.1944	5.1446	79
12	0.2079	0.9781	0.2126	4.7046	78
13	0.2250	0.9744	0.2309	4.3315	77
14	0.2419	0.9703	0.2493	4.0108	76
15	0.2588	0.9659	0.2679	3.7321	75
16	0.2756	0.9613	0.2867	3.4874	74
17	0.2924	0.9563	0.3057	3.2709	73
18	0.3090	0.9511	0.3249	3.0777	72
19	0.3256	0.9455	0.3443	2.9042	71
20	0.3420	0.9397	0.3640	2.7475	70
21	0.3584	0.9336	0.3839	2.6051	69
22	0.3746	0.9272	0.4040	2.4751	68
23	0.3907	0.9205	0.4245	2.3559	67

Kąt w stopniach	Sinus	Cosinus	Tangens	Cotangens	Kąt w stopniach
24	0.4067	0.9135	0.4452	2.2460	66
25	0.4226	0.9063	0.4663	2.1445	65
26	0.4384	0.8988	0.4877	2.0503	64
27	0.4540	0.8910	0.5095	1.9626	63
28	0.4695	0.8829	0.5317	1.8807	62
29	0.4848	0.8746	0.5543	1.8040	61
30	0.5000	0.8660	0.5774	1.7321	60
31	0.5150	0.8572	0.6009	1.6643	59
32	0.5299	0.8480	0.6249	1.6003	58
33	0.5446	0.8387	0.6494	1.5399	57
34	0.5592	0.8290	0.6745	1.4826	56
35	0.5736	0.8192	0.7002	1.4281	55
36	0.5878	0.8090	0.7265	1.3764	54
37	0.6018	0.7986	0.7536	1.3270	53
38	0.6157	0.7880	0.7813	1.2799	52
39	0.6293	0.7771	0.8098	1.2349	51
40	0.6428	0.7660	0.8391	1.1918	50
41	0.6561	0.7547	0.8693	1.1504	49
42	0.6691	0.7431	0.9004	1.1106	48
43	0.6820	0.7314	0.9325	1.0724	47
44	0.6947	0.7193	0.9657	1.0355	46
45	0.7071	0.7071	1.0000	1.0000	45

B I B L I O G R A F I A.

A. Prace polskie, wydane na terenie Wielkiej Brytanii.

1. Stefan Jasienski. Rękopis pracy pt. "Akumulatory przenośne kwasowe i ługowe".
2. Ministerstwo Obrony Narodowej. Centralna Komisja Regulaminowa. Teoria Radiotechniki. Cz. I.

B. Prace w języku angielskim.

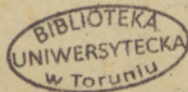
1. R. Stranger. The Outline of Wireless.
2. R. Stranger. Mathematics of Wireless.
3. R.W. Hutchinson. Wireless - Its Principles and Practice.
4. Air Ministry. Electrical and Radio Notes for Wireless Operators.
5. A.L.M. Sowerby. Foundations of Wireless.
6. J.A. Ratcliffe. Physical Principles of Wireless.
7. J.H. Reyner. Modern Radio Communication, tom I i II.
8. Radio Society of Great Britain. The Amateur Radio Handbook.
9. Radio Society of Great Britain. Radio Handbook Supplement.
10. American Radio Relay League. The Radio Amateur's Handbook.
11. Admiralty Handbook of Wireless Telegraphy, tom I i II.
12. H.M. Dowsett. Handbook of Technical Instructions for Wireless Telegraphists.
13. Gregory and Hadley. A Class Book of Physics, Część VI, VII i VIII, Magnetism, Static Electricity, Voltaic Electricity.
14. Signal Training. Tom II, część I, Electricity and Magnetism.
15. W.P. Maycock. First Book of Electricity and Magnetism.
16. W.S. Ibbetson. Accumulator Charging, Maintenance and Repair.

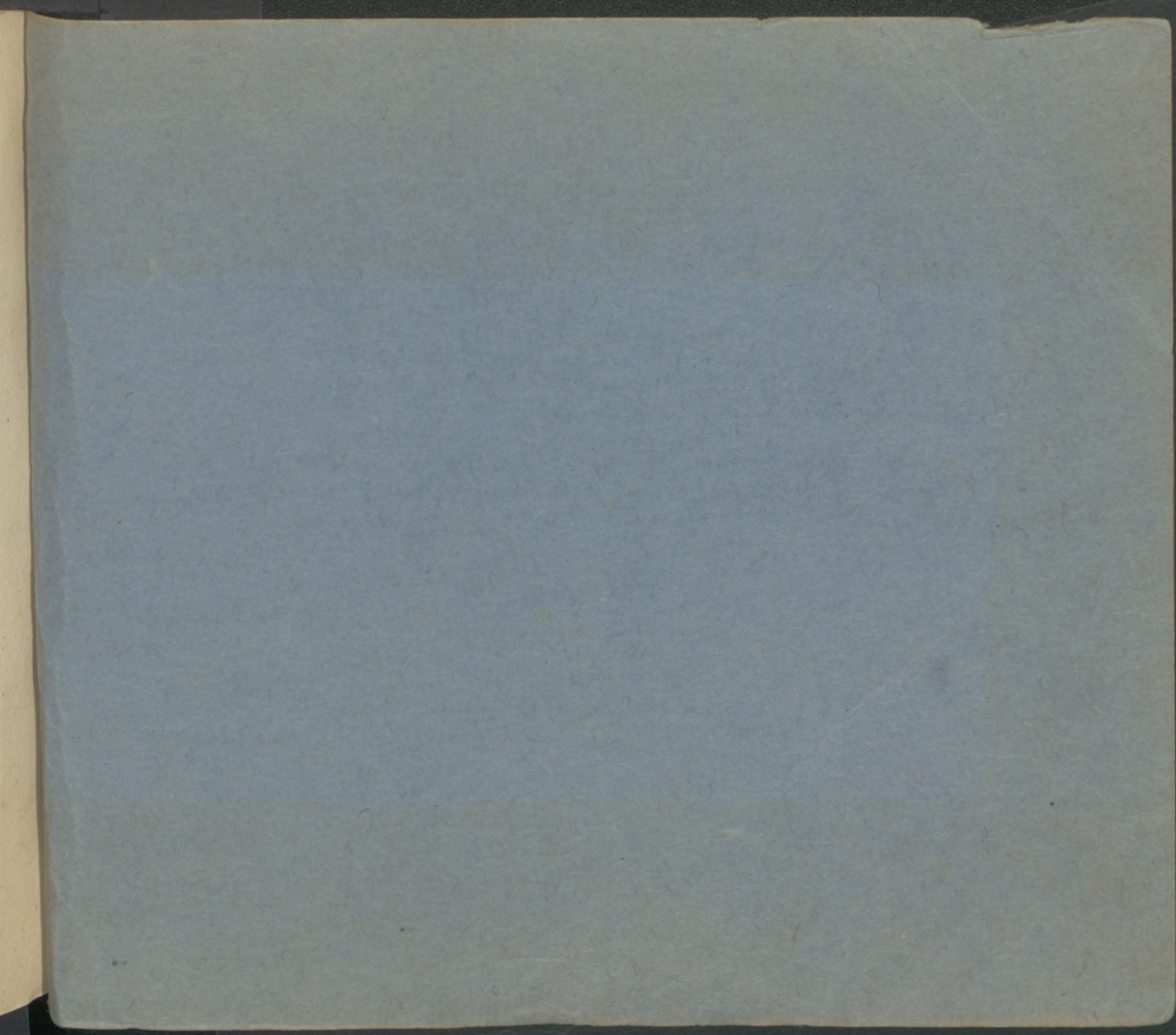
17. E.T.A.Rapson. Experimental Electrical Engineering.
18. E.T.A.Rapson. Problems in Radio Engineering.
19. S.G. Monk. Classified Examples in Electrical Engineering, tom I i II.
20. W.J.White. Questions and Solutions in Magnetism and Electricity.
21. A.M.Codd. Practical Primary Cells.
22. H.Cotton. Electrical Technology.
23. Sir Ambrose Fleming. Pitman's Electrical Educator.
24. J.R.Barr and D.J.Bolton. Principles of D.C.Electrical Engineering.
25. E.N.Pink. Electric and Magnetic Circuits.
26. W.P.Maycock. Electric Circuit Theory and Calculations.
27. W.P.Maycock. Alternating Current Work.
28. P.Kemp. Alternating Current Circuit.
29. P.J.L. Smith. Higher Test Papers in Magnetism and Electricity.
30. W.Tolmé Maccall. Electrical Engineering. Tom I.Direct Current.
Tom.II.Alternating Current.
31. H.S.Allen and H.Moore. A Text-Book of Practical Physics.
32. B.L.Worsnop and H.T.Flint. Advanced Practical Physics for Students.
33. F.E.Terman. Measurements in Radio Engineering.
34. K.Henney. Radio Engineering Handbook.
35. S.G.Starling. Electricity and Magnetism.
36. C. Stoner. Magnetism.
37. D.Owen. Alternating Current Measurements.
38. F.J.Teago. The Commutator Motor.
39. E.W.Golding. Electrical Measurements and Measuring Instruments.
40. A.Russell. Alternating Currents.
41. C.P.Steinmetz. Theory and Calculation of Electric Circuits.
42. Maxwell. Electricity and Magnetism.

43. A.T.Dover. Theory and Practice of Alternating Currents.
44. O.G.C.Dahl. Electric Circuits.
45. C.P.Steinmetz. Alternating Current Phenomena.
46. J.L.La Cour and O.S.Bragstad. Theory and Calculation of Electric Circuits.
47. P.R.Coursey. Electrical Condensers.
48. J.H.McNecroft. Principles of Radio Communication.
49. F.A.Laws. Electrical Measurements.
50. H.S.Allen. Electrons and Waves.

U w a g a: Spis powyższy obejmuje jedynie niektóre dzieła wybrane jako podstawowe z pośród niezmiernie bogatej literatury technicznej w języku angielskim.

-----o-----





Arch. Emigracji

Biblioteka

Główna

UMK Toruń

1392780

Biblioteka Główna UMK



300021016243

Arch. Emigracji

Biblioteka

Główna

UMK Toruń

1392780



Biblioteka Główna UMK



300021016243