

## **REDAKCJA NACZELNA**

### **Redaktor naczelny**

*prof. dr hab. inż. Izabella Dunin-Kwinta*

### **Komitet Naukowy**

*prof. dr hab. inż. Jerzy Girtler*

*dr hab. inż. Bernard Wiśniewski, prof. nadzw. WSM w Szczecinie*

**przewodniczący Komitetu Wydawnictw Dydaktycznych Wydziału Nawigacyjnego**

*dr hab. inż. Wojciech Piszczek, prof. nadzw. WSM w Szczecinie*

**przewodniczący Komitetu Wydawnictw Dydaktycznych Wydziału Mechanicznego dr**

*hab. inż. Bolesław Kuźniewski, prof. nadzw. WSM w Szczecinie*

## **RECENZENT**

*dr inż. Tadeusz Piotrowski*

## **REDAKTOR MERYTORYCZNY**

*prof. dr inż. Mieczysław Wierzejski*

ISBN 83-86494-61-1

# SPIS TREŚCI

<b>Wstęp</b> .....	<b>9</b>
<b>Wybrane jednostki układu SI</b> .....	<b>10</b>
<b>1. Obwody elektryczne prądu stałego</b> .....	<b>11</b>
1.1. Prąd elektryczny .....	11
1.2. Potencjał, napięcie i siła elektromotoryczna .....	13
1.3. Prawo Ohma .....	15
1.4. Rezystancja .....	17
1.5. Prawa Kirchhoffa.....	18
1.5.1. Pierwsze prawo Kirchhoffa.....	18
1.5.2. Drugie prawo Kirchhoffa.....	19
1.6. Rezystancja zastępcza .....	20
1.7. Łączenie elektrycznych źródeł energii .....	22
1.8. Kondensatory .....	24
1.9. Energia i moc prądu stałego .....	27
<b>2. Pole magnetyczne</b> .....	<b>29</b>
2.1. Podstawowe wielkości pola magnetycznego .....	29
2.1.1. Obraz pola magnetycznego.....	29
2.1.2. Indukcja magnetyczna; powstawanie siły elektrodynamicznej w polu magnetycznym .....	30
2.2. Zjawisko indukcji elektromagnetycznej .....	33
2.2.1. Strumień magnetyczny.....	33
2.2.2. Siła elektromotoryczna indukowana.....	34
2.3. Magnesowanie ciał.....	37
2.3.1. Natężenie pola magnetycznego .....	37
2.3.2. Magnesowanie ferromagnetyków.....	38
2.4. Obwody magnetyczne .....	39
2.4.1. Siła magnetomotoryczna.....	39
2.4.2. Prawo Ampere'a. Napięcie magnetyczne.....	40
2.4.3. Reluktancja.....	40
2.4.4. Obliczanie obwodów magnetycznych.....	41
2.5. Zjawisko samoindukcji .....	44
2.6. Prądy wirowe .....	45
<b>3. Obwody prądu przemiennego</b> .....	<b>47</b>
3.1. Prąd przemienny - pojęcia podstawowe .....	47

3.1.1. Prądy zmienne .....	47
3.1.2. Wartość średnia i skuteczna prądu przemiennego .....	49
3.1.3. Zapis wektorowy prądu sinusoidalnego .....	50
3.1.4. Zapis symboliczny prądu sinusoidalnego .....	50
3.2. Obwody prądu przemiennego .....	52
3.2.1. Rezystancja $R$ w obwodzie prądu przemiennego .....	52
3.2.2. Indukcyjność $L$ w obwodzie prądu przemiennego .....	53
3.2.3. Pojemność $C$ w obwodzie prądu przemiennego .....	55
3.2.4. Obwód z szeregowo połączonymi elementami $R, Li C$ .....	57
3.2.5. Obwód z równolegle połączonymi elementami $R, Li C$ .....	59
3.3. Moc prądu elektrycznego przemiennego .....	61
3.3.1. Pojęcie mocy w obwodzie prądu przemiennego .....	61
3.3.2. Moc w obwodach prądu przemiennego .....	64
3.4. Układy trójfazowe prądu przemiennego .....	67
3.4.1. Połączenie w gwiazdę.....	69
3.4.2. Połączenie w trójkąt.....	70
3.4.3. Moc elektryczna w trójfazowym układzie prądu przemiennego.....	72
3.4.4. Układy sieci trójfazowych.....	74
<b>4. Miernictwo i sygnalizacja .....</b>	<b>77</b>
4.1. Budowa mierników elektrycznych .....	77
4.2. Dokładność pomiaru miernikami elektrycznego .....	79
4.2.1. Uchyby mierników .....	79
4.2.2. Klasy dokładności mierników .....	81
4.3. Podstawowe rodzaje mierników elektrycznych .....	81
4.3.1. Mierniki magnetoelektryczne.....	81
4.3.2. Mierniki magnetoelektryczne ilorazowe .....	83
4.3.3. Mierniki elektromagnetyczne.....	85
4.3.4. Mierniki elektrodynamiczne.....	86
4.3.5. Mierniki ferrodynamiczne.....	88
4.3.6. Mierniki indukcyjne .....	88
4.3.7. Mierniki rezonansowe .....	89
4.3.8. Oznaczenia na skalach mierników elektrycznych .....	89
4.4. Pomiary wielkości elektrycznych .....	91
4.4.1. Pomiary prądu i napięcia.....	91
4.4.2. Pomiary rezystancji.....	93
4.4.3. Pomiary mocy układów trójfazowych .....	99
4.5. Pomiary wielkości nieelektrycznych .....	10
2	
4.5.1. Pomiary temperatury.....	10
3	
4.5.2. Pomiary prędkości obrotowej.....	10
5	
4.5.3. Pomiary wilgotności powietrza.....	10
7	
4.6. Sygnalizacja .....	10
8	

4.6.1. Sygnalizacja alarmowa ogólnookrętowa.....	108
4.6.2. Sygnalizacja pożarowa.....	109
4.6.3. Sygnalizacja drzwi wodoszczelnych .....	111
4.6.4. Sygnalizacyjne łącze selsynowe.....	112
<b>5. Elementy i układy energoelektroniczne .....</b>	<b>115</b>
5.1. Elementy półprzewodnikowe.....	115
5.1.1. Wprowadzenie.....	115
5.1.2. Złącze p-n .....	116
5.1.3. Dioda prostownicza.....	118
5.1.4. Dioda Zenera (stabilistor).....	119
5.1.5. Tranzystory bipolarne klasyczne.....	120
5.1.6. Tranzystory mocy .....	122
5.2. Przekształtniki energoelektroniczne .....	127
5.2.1. Funkcja przekształtnika energoelektronicznego.....	127
5.2.2. Prostowniki niesterowane.....	128
5.2.3. Prostowniki sterowane.....	130
5.2.4. Praca prostownika sterowanego przy obciążeniu typu RE.....	131
5.2.5. Sterowniki prądu przemiennego.....	132
5.2.6. Sterowniki prądu stałego.....	132
5.2.7. Falowniki.....	133
<b>6. Maszyny prądu stałego.....</b>	<b>135</b>
6.1. Prądnice prądu stałego.....	135
6.1.1. Struktura maszyny prądu stałego.....	135
6.1.2. Prądnica obcowzbudna.....	141
6.1.3. Prądnica bocznikowa.....	142
6.1.4. Prądnica szeregowo-bocznikowa.....	144
6.1.5. Praca równoległa prądnic szeregowo-bocznikowych.....	145
6.2. Silniki elektryczne prądu stałego.....	147
6.2.1. Zasada działania silnika prądu stałego .....	147
6.2.2. Rozruch silników prądu stałego.....	150
6.2.3. Hamowanie silników prądu stałego.....	151
6.2.4. Silnik szeregowy prądu stałego .....	152
6.2.5. Silniki uniwersalne .....	153
6.3. Straty, sprawność i nagrzewanie się maszyn elektrycznych.....	155
<b>7. Prądnice synchroniczne .....</b>	<b>159</b>
7.1. Zasada budowy i działania prądnicy synchronicznej.....	159
7.2. Prądnice okrętowe.....	162
7.2.1. Regulacja napięcia prądnic okrętowych .....	162
7.2.2. Przepisy PRS dotyczące stabilizacji napięcia i częstotliwości .....	167
7.3. Praca równoległa prądnic.....	169
7.3.1. Synchronizacja prądnic.....	169

7.3.2. Metody synchronizacji.....	170
7.3.3. Rozpływ mocy czynnej przy pracy równoległej prądnic.....	173
7.3.4. Rozpływ mocy biernej podczas pracy równoległej prądnic....	175
<b>8. Silniki asynchroniczne.....</b>	<b>177</b>
8.1. Budowa i zasada działania silników asynchronicznych .....	177
8.1.1. Budowa silników asynchronicznych .....	177
8.1.2. Zasada działania i charakterystyki silnika asynchronicznego.	180
8.2. Rozruch silników asynchronicznych .....	184
8.2.1. Przebieg rozruchu silnika asynchronicznego.....	184
8.2.2. Rozruch silników pierścieniowych.....	185
8.2.3. Rozruch z zastosowaniem przełącznika gwiazda -trójkąt.....	186
8.2.4. Rozruch silnika klatkowego za pomocą autotransformatora...	187
8.2.5. Rozruch silników przy obniżonych wartościach napięcia i częstotliwości.....	188
8.3. Regulacja prędkości obrotowej silników asynchronicznych.....	188
8.3.1. Regulacja prędkości przez zmianę liczby par biegunów uzwojenia stojana.....	188
8.3.2. Regulacja przez zmianę napięcia zasilającego silnik .....	190
8.3.3. Regulacja przez zmianę częstotliwości napięcia zasilającego silnik.....	191
8.3.4. Regulacja prędkości silników pierścieniowych.....	192
8.4. Hamowanie silników asynchronicznych.....	193
8.5. Silniki asynchroniczne głębokożłobkowe i dwuklatkowe.....	194
8.6. Silniki asynchroniczne jednofazowe.....	195
9. Transformatory.....	201
9.1. Zasada działania i stany pracy transformatora.....	201
9.1.1. Rodzaje i budowa transformatorów.....	201
9.1.2. Przekładnia transformatora.....	201
9.1.3. Stany pracy transformatora.....	203
9.2. Transformatory trójfazowe .....	205
9.2.1. Połączenia uzwojeń transformatorów trój fazowych.....	205
9.2.2. Praca równoległa transformatorów trójfazowych.....	206
9.3. Transformatory pomiarowe (przekładniki).....	207
9.4. Autotransformatory.....	210
10. Akumulatory.....	213
10.1. Budowa i zasada działania akumulatora .....	213
10.2. Akumulatory kwasowe.....	216
10.3. Akumulatory zasadowe.....	219
10.4. Obsługa akumulatorów.....	221
<b>11. Aparaty i zabezpieczenia elektryczne.....</b>	<b>223</b>
11.1. Zwarcia w okrętowych systemach energetycznych.....	223
11.2. Łączniki elektryczne.....	226

11.2.1. Klasyfikacja aparatów elektrycznych.....	226
11.2.2. Łączniki wtykowe.....	232
11.2.3. Łączniki ręczne.....	232
11.2.4. Bezpieczniki topikowe .....	234
11.2.5. Łączniki zwarciowe mechanizmowe.....	238
11.2.6. Wyłączniki samoczynne instalacyjne i silnikowe.....	242
11.2.7. Styczniki.....	244
11.2.8. Przekazniki.....	245
11.3. Zabezpieczenia.....	247
11.3.1. Zabezpieczenia obwodów oświetlenia i ogrzewania .....	247
11.3.2. Zabezpieczenia silnika asynchronicznego klatkowego .....	248
11.3.3. Zabezpieczenia prądnic synchronicznych .....	251
11.3.4. Zabezpieczanie transformatorów elektroenergetycznych ..	254
<b>12. Napęd elektryczny .....</b>	<b>255</b>
12.1. Równanie ruchu napędu.....	255
12.2. Rodzaje pracy maszyn elektrycznych.....	257
12.3. Przykłady rozwiązań okrętowych napędów elektrycznych .....	258
12.3.1. Napęd pomp i wentylatorów wirowych .....	258
12.3.2. Napęd sterów strumieniowych .....	263
12.3.3. Napęd wciągarek kotwicznych .....	264
12.3.4. Napęd wciągarek ładunkowych .....	266
12.3.5. Napęd wirówki.....	269
<b>13. Oświetlenie.....</b>	<b>271</b>
13.1. Podstawowe wielkości techniki świetlnej.....	271
13.2. Elektryczne źródła światła.....	273
13.2.1. Żarówki .....	273
13.2.2. Lampy fluoroscencyjne (świetlówki) .....	276
13.2.3. Lampy rtęciowe .....	280
13.2.4. Lampy sodowe .....	281
13.2.5. Lampy ksenonowe i indukcyjne.....	282
13.3. Oprawy oświetleniowe .....	283
13.4. Oświetlenie pomieszczeń i pokładów otwartych .....	284
13.5. Oświetlenie awaryjne .....	287
13.6. Oświetlenie nawigacyjne .....	288
<b>14. Elektroenergetyka okrętowa .....</b>	<b>291</b>
14.1. Rozdział energii elektrycznej .....	291
14.1.1. Układy sieci okrętowych .....	291
14.1.2. Systemy rozdziału i przesyłu energii elektrycznej .....	293
14.2. Wytwarzanie energii elektrycznej .....	297
14.2.1. Główne źródła energii elektrycznej .....	297
14.2.2. Awaryjne źródła energii elektrycznej .....	304
14.3. Rozdzielnice okrętowe .....	306

14.3.1. Konstrukcja rozdzielnic .....	306
14.3.2. Układ aparatów w rozdzielnicy .....	309
14.3.3. Zasilanie obwodów ważnych .....	311
14.3.4. Zasilanie kontenerów izotermicznych .....	312
14.4. Przewody i kable okrętowe .....	314
14.4.1. Budowa przewodów elektrycznych .....	314
14.4.2. Znakowanie przewodów i kabli .....	317
14.4.3. Opisy przewodów podawane na schematach .....	320
<b>15. Bezpieczeństwo pracy przy urządzeniach elektrycznych .....</b>	<b>321</b>
15.1. Zagrożenie porażeniem - przyczyny i skutki .....	321
15.2. Środki ochrony przeciwporażeniowej .....	328
15.3. Ochrona przed dotykiem bezpośrednim .....	328
15.4. Ochrona przed dotykiem pośrednim .....	332
15.4.1. Samoczynne szybkie wyłączenie zasilania przez zabezpieczenia nadmiarowo-prądowe (zerowanie).....	332
15.4.2. Wyłączniki różnicowoprądowe .....	333
15.4.3. Urządzenia wykonane w II klasie ochronności .....	335
15.4.4. Izolowanie stanowiska .....	336
15.4.5. Separacja odbiornika .....	336
15.4.6. Kontrola stanu izolacji.....	337
15.4.7. Kompensacja pojemnościowych prądów rażenia .....	339
15.5. Ochrona przed dotykiem bezpośrednim i pośrednim .....	340
15.6. Inne środki zapobiegania porażeniom elektrycznym na statku .....	341
15.6.1. Uziemienie ochronne .....	341
15.6.2. Indywidualne środki ochrony .....	342
<b>Literatura .....</b>	<b>343</b>

## **Wstęp**

Skrypt jest przeznaczony dla studentów studiów dziennych i zaocznych Wydziału Nawigacyjnego specjalności transport morski, połowy morskie, inżynieria ruchu morskiego oraz eksploatacja portów i floty a także dla słuchaczy kursów Studium Doskonalenia Kadr Oficerskich. Skrypt może być pomocny dla słuchaczy innych wydziałów nielektrycznych kierunków gospodarki morskiej.

Opracowanie niniejsze zawiera szeroki przegląd zagadnień podstaw elektrotechniki, energoelektroniki, miernictwa, maszyn elektrycznych, aparatów, zabezpieczeń, elektroenergetyki okrętowej i innych zagadnień technicznych występujących na jednostkach pływających oraz zapleczu lądowym floty morskiej. Tak szeroki zakres wiedzy przedstawiony został w maksymalnie zwartej i podstawowej formie, umożliwiając łatwiejsze opanowanie treści programowych.



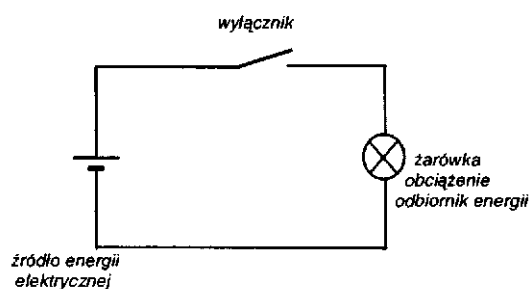
## Wybrane jednostki układu SI

Wielkość fizyczna		Jednostka	
nazwa	oznaczenie	nazwa	oznaczenie
Długość, odległość	$l$	metr	m
Masa	$m$	kilogram	kg
Czas	$t$	sekunda	s
Temperatura bezwzględna	$T$	kelwin	K
Temperatura względna	$t, \tau$	stopień Celsjusza	°C
Prąd elektryczny	$I, i$	amper	A
Prędkość liniowa	$v$	metr na sekundę	m/s
Kąt płaski	$\alpha$	radian stopień	rad °
Kąt bryłowy	$\omega$	steradian	sr
Prędkość kątowna	$\omega$	radian na sekundę	rad/s
Siła	$F$	niuton	N
Moment obrotowy	$M$	niutonometr	Nm
Ciśnienie	$p$	paskal	Pa = N/m <sup>2</sup>
Praca, energia, ilość ciepła	$A, W, Q$	dżul	J = N·m/s <sup>2</sup>
Moc czynna	$P$	wat	W = J/s = A·V
Moc bierna	$Q$	war	var = A·V
Moc pozorna	$S$	woltamper	VA = A·V
Ładunek elektryczny	$Q, q$	kulomb	C = A·s
Napięcie, potencjał, Siła elektromotoryczna	$U, u, V, v$ $E, e$	wolt	V = W/A
Natężenie pola elektrycznego	$E$	wolt na metr	V/m
Natężenie pola magnetycznego	$H$	amper na metr	A/m
Indukcja magnetyczna	$B$	tesla	T = V·s/m <sup>2</sup>
Potencjał magnetyczny	$V_m$	amper	A
Siła magnetomotoryczna	$\Theta$	amper (amper·zwój)	A (A·z)
Strumień magnetyczny	$\Phi$	weber	Wb = V·s
Przenikalność magnetyczna	$\mu$	henr na metr	H/m = A/m <sup>2</sup>
Przenikalność elektryczna	$\epsilon$	farad na mter	F/m = A·s / V·m
Częstotliwość	$f$	herc	Hz = 1/s
Pulsacja	$\omega$	radian na sekundę	rad/s
Rezystancja, reaktancja impedancja	$R, X$ $Z$	om	$\Omega = V/A$
Konduktancja, susceptancja, admitancja	$G, B$ $Y$	simens	$S = 1/\Omega = A/V$
Konduktywność	$\gamma$	simens na metr	S/m
Rezystywność	$\rho$	om na metr	$\Omega/m$
Pojemność elektryczna	$C$	farad	F = C/V
Indukcyjność	$L$	henr	H = V·s/A
Strumień świetlny	$\Phi$	lumen	lm = cd·sr
Światłość	$I$	kandela	cd
Natężenie oświetlenia	$E$	luks	lx = 1 m/m <sup>2</sup>
Skuteczność świetlna	$\eta$	lumen na wat	lm/W

# 1. Obwody elektryczne prądu stałego

## 1.1. Prąd elektryczny

Jeżeli w obwodzie przedstawionym na rysunku 1.1 zamkniemy wyłącznik, to żarówka zaświeci się. Będzie to działanie prądu elektrycznego. Prąd płynie ze źródła od jednego zacisku przez wyłącznik, żarówkę do drugiego zacisku. Tę drogę przepływu prądu nazywamy **obwodem zewnętrznym**. Prąd płynie również wewnątrz źródła od zacisku do zacisku lub od bieguna do bieguna. Tę wewnętrzną drogę prądu nazywamy **obwodem wewnętrznym**.



Rys. 1.1. Obwód prądu elektrycznego

Żarówka jako odbiornik energii elektrycznej świeci dzięki przepływowi prądu elektrycznego, tj. **przepływowi elektronów**. Elektron jest to najmniejszy ujemny ładunek elektryczny w atomie. Najmniejszym ładunkiem dodatnim jest proton.

Nie wszystkie elektrony są związane z atomami. Niektórym z nich udaje się uwolnić z orbity atomu, elektrony takie nazywamy swobodnymi (wolnymi). Elektrony swobodne nie mają ustalonego kierunku ruchu; przy braku zewnętrznych sił poruszają się w sposób nieuporządkowany, a ich prędkość jest rzędu  $10^4$  -r  $10^5$  m/s. Jeżeli elektrony swobodne zostaną poddane działaniu sił zewnętrznych (zwanych siłami pola elektrycznego), to ich ruch staje się uporządkowany. Taki wymuszony, uporządkowany ruch ładunków elektrycznych nazywamy **prądem elektrycznym**.

Im więcej swobodnych elektronów zawiera jednostka objętości materiału, tym jest mniejsza jego oporność i prąd swobodniej przepływa. Taki materiał nazywamy **przewodnikiem elektrycznym pierwszego rodzaju**. Dotyczy to przede wszystkim metali, ale niemetal też może być przewodnikiem, np. węgiel. Przewodniki te przy przepływie prądu nie ulegają żadnym zmianom chemicznym. Przewodniki elektryczne pierwszego rodzaju są wykorzystywane w elektrotechnice do budowy części wiodących prąd większości urządzeń elektrycznych.

Oprócz przewodników pierwszego rodzaju istnieją też **przewodniki elektryczne drugiego rodzaju**, w których prąd elektryczny polega na przemieszczaniu się ładunków zwanych jonami dodatnimi (kationami) i ujemnymi (anionami). Kation powstaje w wyniku pozbawienia atomu elektronu (lub atomów tworzących cząsteczkę), zaś anion - w wyniku przyłączenia jednego lub więcej elektronów do atomu (lub atomów wchodzących w skład cząsteczki). Przewodniki elektryczne drugiego rodzaju zwane są powszechnie **elektrolitami**. Zalicza się do nich roztwory wodne kwasów, zasad i soli. Podczas przepływu prądu elektrolity ulegają zmianom chemicznym. Elektrolity są stosowane np. w akumulatorach i urządzeniach galwanizacyjnych.

Przeciwnościem przewodnika jest **izolator**. W temperaturze pokojowej izolator ma tylko nieliczne swobodne elektrony w jednostce objętości, a więc brak w nim nośników ładunku elektrycznego, tzn. prądu elektrycznego.

Są materiały, które posiadają obydwie cechy przewodnika i izolatora - są to **półprzewodniki**. Zwrot prądu w przewodnikach pierwszego rodzaju umownie przyjmuje się jako przeciwny do uporządkowanego ruchu elektronów (ładunków ujemnych). W przewodnikach drugiego rodzaju, poruszają się w przeciwnych kierunkach zarówno jony dodatnie, jak i ujemne, lecz umownie przyjmuje się zwrot prądu tak samo jak w przewodnikach pierwszego rodzaju, tj. przeciwny do kierunku ruchu jonów ujemnych.

Wielkością fizyczną charakteryzującą prąd elektryczny jest **natężenie prądu** / (potocznie nazywane **prądem**). Chwilową wartość natężenia prądu elektrycznego możemy zdefiniować jako stosunek **ładunku elektrycznego  $dq$**  do czasu  $dt$ , w którym nastąpił przepływ tego ładunku:

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.1)$$

Jeżeli wartość prądu oraz kierunek przepływu pozostają niezmiennie w czasie, mamy do czynienia z prądem stałym. Z zależności (1.1) otrzymujemy wówczas zależność:

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

Jednostką natężenia prądu (a jednocześnie jedną z podstawowych jednostek międzynarodowego układu miar SI) jest **amper** (A). Definicja ampera jest oparta na wzajemnym oddziaływaniu dwu przewodów, w których płynie prąd elektryczny (patrz pkt. 2.1.2).

*Prąd elektryczny ma natężenie 1 ampera, jeśli płynąc przez dwa równoległe prostoliniowe (umieszczone w próżni, nieskończenie długie o znikomo małym przekroju kołowym) przewodniki odległe od siebie o  $l$  m, wywołałby między tymi przewodnikami siłę  $2 \cdot 10^{-7} N$  na każdy metr długości przewodu.*

Wielkość natężenia prądu podawana jest również często w jednostkach pochodnych - np. mikroamper ( $\mu A$ ), miliamper (mA) i kiloamper (kA):

$$\begin{aligned}1 \mu A &= 10^{-6} A, \\1 mA &= 10^{-3} A, \\1 kA &= 10^3 A.\end{aligned}$$

**Ładunek elektryczny Q** przenoszony przez prąd zależy zatem od natężenia prądu i czasu trwania jego przepływu:

Jednostką ładunku elektrycznego jest **kulomb** (C):

$$1 C = 1 A \cdot 1 s$$

Najmniejszym ładunkiem elektrycznym jest **ładunek elementarny** niesiony przez cząstki elementarne (elektron i proton):

$$1C = 6,24 \cdot 10^{18} e$$

gdzie  $e$  - ładunek elementarny.

## 1.2. Potencjał, napięcie i siła elektromotoryczna

W przestrzeni otaczającej ładunek elektryczny (np.  $q_1$ ) występuje pole elektryczne. Jeżeli w polu tym w odległości  $r$  zostanie umieszczony inny ładunek  $q_2$ , to będzie oddziaływała na niego siła  $F$ . Zgodnie z prawem **Coulomba** siła ta jest określona wzorem:

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4 \pi \epsilon r^2} \quad (1.3)$$

gdzie:

$\epsilon$  - wielkość charakteryzująca środowisko zwana przenikalnością elektryczną

- przemianę elektrochemiczną,
- działanie pola magnetycznego,
- przemianę termiczną (zjawisko termoelektryczne),
- działanie mechaniczne (zjawisko piezoelektryczne).

### 1.3. Prawo Ohma

W pierwszej połowie XIX wieku Georg Simon Ohm stwierdził na drodze doświadczalnej, że wartość natężenia prądu elektrycznego *zależy* nie tylko od napięcia między końcami przewodnika, ale i od pewnej cechy określającej przewodnik zwanej **rezystancją** (oporem)  $R$ . Zależność między powyższymi wielkościami obwodu elektrycznego określa **prawo Ohma**.

*Natężenie prądu  $I$  jest proporcjonalne do wartości napięcia  $U$  i odwrotnie proporcjonalne do wartości rezystancji  $R$ :*

(1.7)

To samo prawo jest  
formie (rys. 1.2):

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

często przedstawiane w innej

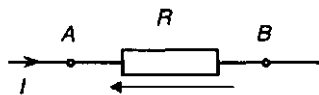
$$U_{AB} = I \cdot R$$

(1.8) Jednostką rezystancji jest om

[Q]:

$$1 \Omega = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A}}$$

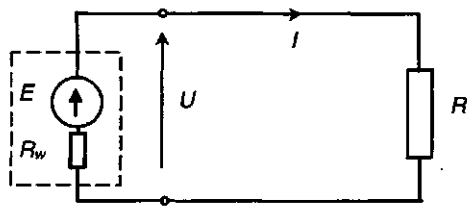
Oznacza to, że napięcie na rezystancji  $R$  pomiędzy punktami  $A$  i  $B$  (nazywane również **spadkiem napięcia na rezystancji  $R$** ), jest proporcjonalne do natężenia prądu / oraz rezystancji  $R$ .



$U_{AB}$ Rys. 1.2. Spadek

napięcia

Na rysunku 1.2 oznaczono strzałkami umownie kierunki prądu i spadku napięcia. Przyjmuje się zazwyczaj, że strzałka spadku napięcia na rezystancji jest skierowana przeciwnie do strzałki prądu.



Rys. 1.3. Obwód ze źródłem rzeczywistym

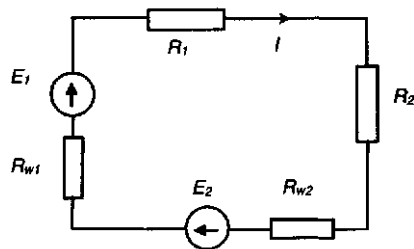
W obwodzie zawierającym rzeczywiste źródło napięcia o sile elektromotorycznej  $E$  i rezystancji wewnętrznej źródła  $R_w$  (rys. 1.3), prawo Ohma można wyrazić zależnością:

$$I = \frac{E}{R + R_w} \quad (1.9)$$

Tak więc napięcie  $U$  na zaciskach źródła obciążonego jest równe sile elektromotorycznej pomniejszonej o spadek napięcia na rezystancji wewnętrznej źródła:

$$U = E - I \cdot R_w \quad (1.10)$$

Zależność 1.10 wskazuje, że napięcie zmierzone przez woltomierz przyłączony do zacisków źródła nieobciążonego ( $I = 0$ ) będzie równe sile elektromotorycznej źródła.



Rys. 1.4. Obwód nierozgałęziony prądu stałego z dwoma źródłami napięcia

W obwodzie nierozgałęzionym, zawierającym wiele źródeł SEM oraz rezystancji (przykład na rys. 1.4.), wartość prądu oblicza się ze wzoru:

$$I = \frac{\sum E}{\sum R} \quad (1.11)$$

Wzór (1.11) wyraża **uogólnione prawo Ohma**.

## 1.4. Rezystancja

Rezystancja zależy od rodzaju materiału przewodnika, jego długości i przekroju poprzecznego oraz temperatury:

(1.12)

gdzie:

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

$l$  - długość [m],  
 $S$  - przekrój [ $\text{mm}^2$ ],  
 $\rho$  - rezystywność [ $\text{Qmm}^2/\text{m}$ ].

**Rezystywność**  $\rho$  nazywamy również **rezystancją właściwą**. Jest to rezystancja jednostkowa, (w tabelach podawana jako rezystancja przewodnika o długości 1m i przekroju poprzecznym 1  $\text{mm}^2$ ).

O cechach przewodnika można mówić również jako o przewodności a nie oporności. **Konduktancja** ( $G$ ) zwana inaczej przewodnością, określona jest jako odwrotność rezystancji i mierzona w **sf mensach** (S)

$$G = \frac{1}{R} = \frac{\gamma S}{l} \quad (1.13)$$

gdzie  $\gamma$  - konduktywność

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

Konduktancja (przewodność) właściwa jest nazywana **konduktywnością**.

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (1.14)$$

Konduktywność najczęściej używanych na przewody metali wynosi: miedzi - 57  $\text{m}/\text{H mm}$ , a aluminium - 35  $\text{m}/\text{Q mm}$ ,

Rezystancja również od zależności:  $R = R_{20} [1 + \alpha_{20} (\tau - 20^\circ)]$  przewodnika zależy temperatury wg

(1.15)

gdzie:

$R_{20}$  - rezystancja przewodnika w temperaturze 20 C,  $T$  - rzeczywista temperatura przewodnika [ $^\circ\text{C}$ ],  $0.20$  - współczynnik temperaturowy rezystancji [ $1/^\circ\text{C}$ ] dla temperatury 20 $^\circ\text{C}$  (podawany w tabelach).

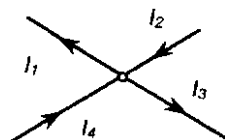
Większość materiałów używanych w elektrotechnice posiada dodatnią wartość współczynnika  $\alpha$  (np. dla miedzi  $\alpha = 0,0038 \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ), tzn. że rezystancja rośnie wraz ze wzrostem temperatury. Jednak należy pamiętać, że stosuje się również materiały o ujemnym współczynniku  $\alpha$ ,

## 1.5. Prawa Kirchhoffa 1.5.1.

### Pierwsze prawo Kirchhoffa

Podstawą analizy obwodów rozgałęzionych, a więc obliczania prądów płynących w poszczególnych gałęziach obwodu oraz spadków napięcia na poszczególnych elementach tego obwodu, są oprócz prawa Ohma, prawa sformułowane przez Roberta Gustawa Kirchhoffa.

Pierwsze prawo Kirchhoffa dotyczy rozplywu prądu elektrycznego w węzle obwodu rozgałęzionego (rys. 1.5).

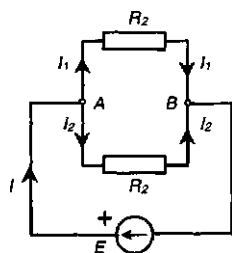


Rys. 1.5. Węzeł obwodu rozgałęzionego

Prąd elektryczny jest to przepływ ładunków elektrycznych. Ilość ładunków dopływających do węzła, jest równa ilości odpływającej, zatem ogólnie można zapisać, że:

*suma algebraiczna prądów w dowolnym węźle jest równa 0:*

$$\sum I = 0 \quad (1.16)$$



Rys. 1.6. Rozplyw prądów w prostym obwodzie równoległym



W przykładowym obwodzie przedstawionym na rys. 1.6. otrzymamy następujące rozkłady prądów:

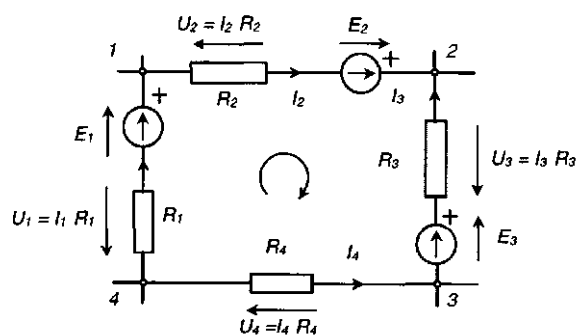
$$\begin{aligned} \text{dla wężła A} & - I - I_1 - I_2 = 0 & \text{lub} & I = I_1 + I_2, \\ \text{dla wężła B} & - I_1 + I_2 - I = 0 & \text{lub} & I = I_1 + I_2. \end{aligned}$$

### 1.5.2. Drugie prawo Kirchhoffa

Drugie prawo Kirchhoffa dotyczy napięć. W każdym obwodzie elektrycznym można wydzielić obwód zamknięty („oczko” - przykład przedstawiono na rys. 1.7). W obwodzie elektrycznym w gałęziach płyną prądy  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  i  $I_4$ . Według prawa Ohma na każdym rezystorze wystąpi spadek napięcia  $U = I \cdot R$  jako efekt działania prądu. Zgodnie z drugim prawem Kirchhoffa:

*Suma algebraiczna sił elektromotorycznych i spadków napięć w obwodzie zamkniętym jest równa 0:*

$$\sum (E, \Delta U) = 0 \quad (1.17)$$



Rys. 1.7. Oczko obwodu rozgałęzionego

Przy sumowaniu należy zwracać uwagę na przyjęty kierunek sumowania. Napięcia o zwrocie zgodnym z kierunkiem sumowania przyjmuje się za dodatnie, zaś napięcia o zwrocie przeciwnym do kierunku sumowania przyjmuje się jako ujemne.

Dla obwodu z rys. 1.7 przyjmując kierunek sumowania zgodny z ruchem wskazówek zegara można napisać, że:

$$-R_2 I_2 + E_2 - E_3 + R_3 I_3 + R_4 I_4 - R_1 I_1 + E_1 = 0$$

## 1.6. Rezystancja zastępcza

Znacznym ułatwieniem w obliczeniu obwodów elektrycznych jest przekształcenie obwodu poprzez zastąpienie szeregowo lub równoległe połączonych rezystancji jedną rezystancją zastępczą. Przekształcenie obwodu elektrycznego w obwód zastępczy nie może zmienić jego parametrów elektrycznych takich jak napięcie i natężenie prądu. **Jest to podstawowy warunek równoważności obwodów.**



Rys. 1.8. Szeregowe łączenie rezystancji

Przy **szeregowym łączeniu rezystancji** (przykład na rys. 1.8) zachodzą zależności:

$$E = \sum(I \cdot R) = I \sum R$$

gdyż prąd /jest wielkością taką samą dla wszystkich elementów.  
Możemy zatem napisać:

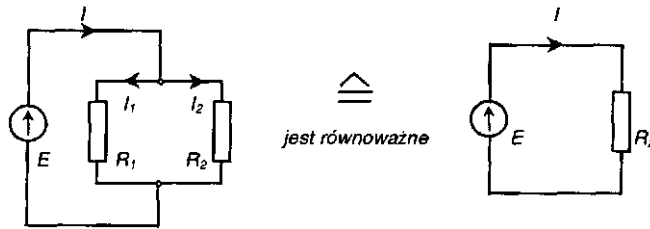
$$\begin{aligned} E &= I \cdot R_z & R_z &= R_1 + R_2 + R_3 \\ R_z &= \sum R \end{aligned} \quad (1.18)$$

*Rezystancja zastępcza połączonych szeregowo rezystancji jest równa sumie poszczególnych rezystancji.*

Przy **równoległym łączeniu rezystancji** (przykład na rys. 1.9) otrzymamy zgodnie z prawami Kirchhoffa:

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 = \frac{E}{R_1} + \frac{E}{R_2} = E \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{E}{R_z} = E \cdot \frac{1}{R_z} \\ \frac{1}{R_z} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \\ \frac{1}{R_z} &= \sum \frac{1}{R} \end{aligned} \quad (1.19)$$

***Odwrotność rezystancji zastępczej, przy równoległym połączeniu rezystancji, jest równa sumie odwrotności poszczególnych rezystancji.***



Rys. 1.9. Równoległe łączenie rezystancji

Pamiętając, że  $\frac{1}{R} = G$  i jest to konduktancja (przewodność), można napisać:

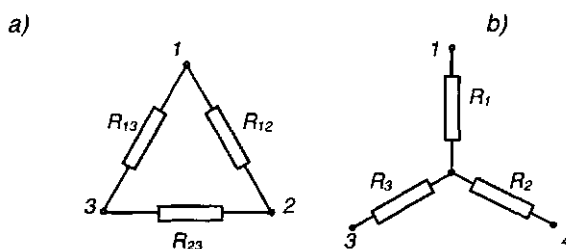
$$G_{zast.} = \sum G \quad (1.20)$$

***Konduktancja zastępcza obwodu, przy równoległym połączeniu rezystancji, jest równa sumie konduktancji poszczególnych gałęzi równoległych.***

W obwodzie z równoległe połączonymi rezystorami, rezystancja zastępcza jest zawsze mniejsza od najmniejszej rezystancji. Odwrotnie przy szeregowym łączeniu rezystancji - rezystancja zastępcza jest zawsze większa od największej rezystancji pojedynczej.

Dość często spotyka się w elektrotechnice wzajemne przekształcenia układów zawierających trzy gałęzie odbiorcze i trzy punkty łączące je z pozostałą częścią obwodu (rys. 1.10). Ze względu na ich ukształtowanie nadano im nazwy układów połączeń w **trójkąt** i w **gwiazdę**.

Możliwość zastąpienia jednego układu równoważnym drugim daje znaczne ułatwienia w obliczaniu obwodów elektrycznych.



Rys. 1.10. Układy połączeń rezystorów między trzema punktami węzłowymi: a) w trójkąt; b) w gwiazdę

Można przekształcić układ połączeń w trójkąt na układ połączeń w gwiazdę, stosując wzory przeliczeniowe:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{R_{12} \cdot R_{13}}{R_{12} + R_{23} + R_{13}} \\
 R_2 &= \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{13}} \\
 R_3 &= \frac{R_{13} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{13}}
 \end{aligned}
 \tag{1.21}$$

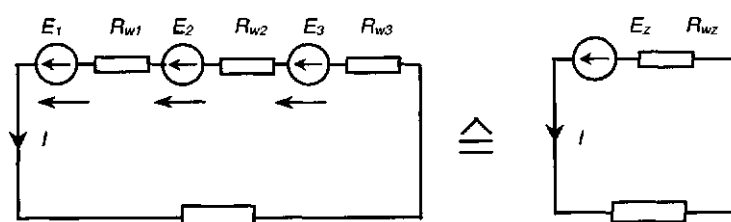
Przy przekształceniu odwrotnym (z gwiazdy na trójkąt) stosuje się wzory:

$$\begin{aligned}
 R_{12} &= R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3} \\
 R_{23} &= R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1} \\
 R_{13} &= R_1 + R_3 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2}
 \end{aligned}
 \tag{1.22}$$

## 1.7. Łączenie elektrycznych źródeł energii

Źródła energii elektrycznej, takie jak akumulatory, ogniwa baterii suchych lub prądnice prądu stałego, mogą być łączone w sposób podobny do łączenia rezystancji, tzn. **szeregowo lub równolegle**.

Obliczanie rezystancji zastępczej rezystancji wewnętrznych  $R_w$  źródeł energii jest wykonywane podobnie jak w części poprzedniej (pkt. 1.6).



Rys. 1.11. Szeregowe łączenie źródeł napięcia

Szeregowe połączenie źródeł energii elektrycznej obciążonych rezystancją zewnętrzną  $R_0$  przedstawia rys. 1.11. Siła elektromotoryczna zastępcza  $E_z$  (uwzględniając kierunek biegunowości źródeł) będzie sumą algebraiczną SEM poszczególnych źródeł:

$$E_z = E_1 + E_2 + E_3$$

$$E_z = \sum E \quad (1.23)$$

Wewnętrzna rezystancja zastępczego źródła przy połączeniu szeregowym wynosi:

$$R_{wz} = \sum R_w \quad (1.24)$$

Jeżeli jest połączonych  $n$  jednakowych źródeł o równych SEM i  $R_w$ , to zachodzą równości:

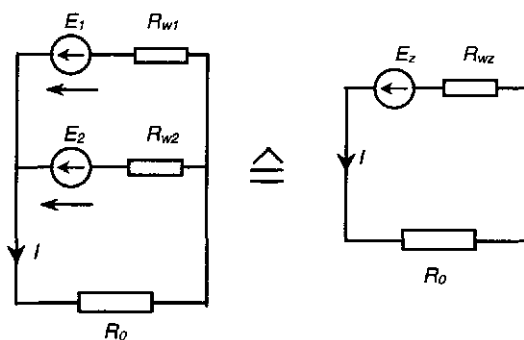
$$E_z = n \cdot E \quad (1.25)$$

$$R_{wz} = n \cdot R_w \quad (1.26)$$

Natężenie prądu w obwodzie przedstawionym na rys. 1.11 wynosi:

$$I = \frac{E_z}{R_{wz} + R_0} = \frac{n \cdot E}{n \cdot R_w + R_0}$$

Równoległe łączenie źródeł energii elektrycznej wykonuje się, jak pokazano na rys. 1.12.



Rys. 1.12. Równoległe łączenie źródeł napięcia

Jeżeli siły elektromotoryczne mają jednakowe wartości, to SEM zastępcza jest równa SEM pojedynczego źródła:

$$E_z = E \quad (1.27)$$

Rezystancje wewnętrzne źródeł należy przekształcić według zasad równoległego łączenia rezystancji:

$$\frac{1}{R_{wz}} = \sum \frac{1}{R_w} \quad (1.28)$$

Przy połączeniu  $m$  jednakowych źródeł:

$$R_{wz} = \frac{R_w}{m} \quad (1.29)$$

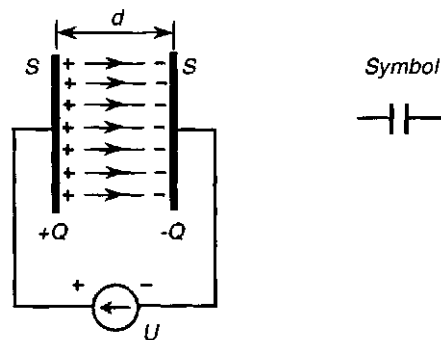
Natężenie prądu elektrycznego w obwodzie jak na rys. 1.12 wyniesie:

$$I = \frac{E}{\frac{R_w}{m} + R_0}$$

W praktyce połączenie równoległe stosuje się tylko dla jednakowych źródeł, gdyż w przeciwnym przypadku między źródłami popłyną tzw. prądy wyrównawcze i poprawna praca równoległa źródeł będzie niemożliwa.

## 1.8. Kondensatory

Kondensator elektryczny jest urządzeniem służącym do gromadzenia ładunków elektrycznych. Najprostszy kondensator - nazywany kondensatorem płaskim, składa się z dwu jednakowych płyt o powierzchni  $S$ , oddzielonych od siebie dielektrykiem (izolacją) o grubości  $d$  jak pokazano na rys.1.13.



Rys. 1.13. Kondensator

Ilość ładunku elektrycznego  $Q$  zgromadzonego na płytkach *zależy* od powierzchni płyt  $S$  i powierzchniowej gęstości ładunku ( $T$ ).

$$Q = \sigma \cdot S$$

gdzie:

$$\sigma = \varepsilon \cdot K = \varepsilon \cdot \frac{U}{d} \left[ \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \right],$$

$$K - \text{natężenie pola elektrycznego} \left[ \frac{\text{V}}{\text{m}} \right],$$

$$\varepsilon - \text{przenikalność elektryczna dielektryka} \left[ \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V} \cdot \text{m}} \right].$$

Podstawiając powyższe zależności, otrzymamy:

$$Q = \varepsilon_w \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{U}{d} \cdot S$$

$$\frac{Q}{U} = \varepsilon_w \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d} = C$$

$$C = \frac{Q}{U} \tag{1.30}$$

$C$  jest współczynnikiem proporcjonalności, który zależy od geometrycznych wymiarów i budowy kondensatora. Wielkość tą nazywamy **pojemnością kondensatora**. Jednostką pojemności jest **farad** (F):

$$1 \text{ F} = \frac{1 \text{ C}}{1 \text{ V}} = \frac{1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s}}{1 \text{ V}}$$

Farad jest jednostką dużą, najczęściej więc stosuje się jego podwielokrotności:

mikrofarad (1  $\mu\text{F}$  =  $10^{-6}$  F),  
nanofarad (1 nF =  $10^{-9}$  F),  
pikofarad (1 pF =  $10^{-12}$  F).

Do naładowania kondensatora potrzebna jest pewna energia  $W$ , która zostaje w nim zmagazynowana w postaci energii pola elektrostatycznego. Jeżeli między okładzinami kondensatora jest napięcie  $U$ , to doprowadzenie ładunku  $dQ$  wymaga pracy:

$$dW = U dQ \tag{1.31}$$

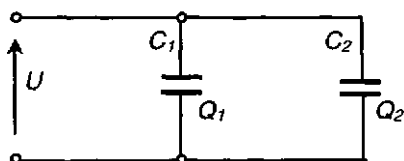
Podstawiając, na podstawie wzoru (1.30):

$$dQ = C dU$$

otrzymujemy po scałkowaniu wartość energii równoważnej wykonanej pracy:

$$W = \int_0^U C U dU = \frac{1}{2} C U^2 \quad (1.32)$$

Kondensatory możemy łączyć w grupy, podobnie jak rezystancje czy źródła energii.



Rys. 1.14. Połączenie równoległe kondensatorów

Przy równoległym łączeniu kondensatorów, (przykład na rys. 1.1 4) między okładkami każdego kondensatora będzie takie samo napięcie  $U$ , lecz ładunki zgromadzone w kondensatorach będą różne. Zgodnie ze wzorem (1.27) wielkość ładunków wynosi:

$$Q_1 = C_1 \cdot U$$

$$Q_2 = C_2 \cdot U$$

Ładunek całkowity  $Q$  jest równy:

$$Q = Q_1 + Q_2$$

$$C_z \cdot U = U(C_1 + C_2)$$

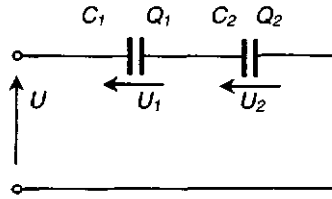
a więc pojemność zastępcza  $C_z$  wyniesie:

$$C_z = C_1 + C_2$$

$$C_z = \sum C \quad (1.33)$$

***Pojemność zastępcza, przy równoległym połączeniu kondensatorów, jest równa sumie pojemności składowych.***





Rys. 1.15. Połączenie szeregowe kondensatorów

Przy szeregowym łączeniu kondensatorów (rys. 1.15) ładunek zgromadzony w każdym kondensatorze będzie taki sam:

$$Q_1 = Q_2 = Q$$

Napięcie całkowite  $U$  równa się sumie napięć na poszczególnych kondensatorach (zgodnie z II prawem Kirchhoffa):

$$U = U_1 + U_2 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} = \frac{Q}{C}$$

stąd

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

$$\frac{1}{C_z} = \sum \frac{1}{C} \quad (1.34)$$

*Odwrotność pojemności zastępczej równa się sumie odwrotności pojemności poszczególnych kondensatorów.*

## 1.9. Energia i moc prądu stałego

W urządzeniach elektrycznych energia elektryczna jest zamieniana na energię cieplną, mechaniczną lub chemiczną. Praca wykonana w tym przypadku jest zależna od napięcia na zaciskach odbiornika (lub źródła energii elektrycznej) -  $U$ , natężenia prądu w odbiorniku -/ oraz czasu jego przepływu  $t$ .

Wzór na pracę  $W$  można wyprowadzić z zależności (1.2) i (1.3):

$$W = U \cdot Q = U \cdot I \cdot t$$

$$W = U \cdot I \cdot t \quad (1.35)$$

Jednostką podstawową energii i pracy wykonanej w obwodach prądu stałego jest **dżul** (J). W praktyce stosuje się jednostkę równoważną dżulowi - **watosekundę** (Ws):

$$1 \text{ Ws} = 1 \text{ W} \cdot 1 \text{ s} = 1 \text{ J} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s} = 1 \text{ VAs}$$

ale powszechnie używa się jednostek pochodnych:

$$\begin{aligned} \text{kilowatogodzina} \quad 1 \text{ kWh} &= 1 \text{ kW} \cdot 3600 \text{ s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Ws} \\ \text{megawatogodzina} \quad 1 \text{ MWh} &= 10^3 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^9 \text{ Ws} \end{aligned}$$

W przypadku szczególnym, gdy prąd przepływa przez rezystor o rezystancji  $R$  energia elektryczna zostaje zamieniona na ciepło. Na podstawie wzoru (1.30) oraz prawa Ohma (1.4) energia cieplna wydzielająca się na odbiorniku jest określona wyrażeniem (zwanym **prawem Joule'a-Lenza**):

$$W = I^2 \cdot R \cdot t \quad (1.36)$$

Zamiana energii elektrycznej na ciepło jest wykorzystywana w grzejnictwie elektrycznym. Na grzejnikach elektrycznych *zaznacza* się zwykle napięcie, na które zostały one zbudowane oraz moc pobieraną.

Moc  $P$  wydzielona w obwodzie w czasie  $t$  jest równa:

$$P = \frac{W}{t} \quad (1.37)$$

a po uwzględnieniu wyrażenia (1.35):

$$P = U \cdot I \quad (1.38)$$

Tak więc moc elektryczna wydzielona w obwodzie określa się iloczynem prądu i napięcia. Jednostką mocy jest **wat** (W):

$$1 \text{ W} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{Nm}}{\text{s}} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A}$$

W praktyce często stosuje się wielokrotności wata - **kilowat** (kW) i **megawat** (MW):

$$\begin{aligned} 1 \text{ kW} &= 10^3 \text{ W}, \\ 1 \text{ MW} &= 10^6 \text{ W}. \end{aligned}$$

Korzystając z prawa Ohma możemy przekształcić  $P = I^2 \cdot R$  ówczas otrzymamy zależności:

$$(1.39) \quad P = \frac{U^2}{R} \quad (1.40)$$

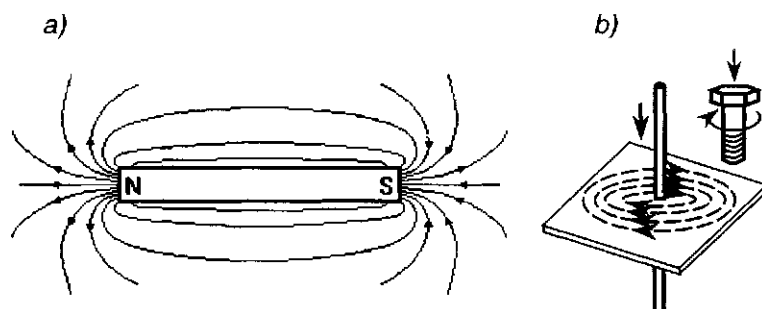
## 2. Pole magnetyczne

### 2.1. Podstawowe wielkości pola magnetycznego 2.1.1.

#### Obraz pola magnetycznego

Magnes posiada zdolność do przyciągania *żelaza*. Zjawisko to jest znane od przeszło 2000 lat. Każdy magnes posiada biegun północny i południowy. Nazwy te wywodzą się z wczesnych doświadczeń, gdy zawieszony magnes ustawiał się w kierunku północ - południe. Doświadczenia te wykazały, że bieguny jednoimienne odpychają się, a bieguny różnoimienne przyciągają się.

Każdy magnes wzbudza w otaczającej go przestrzeni pole magnetyczne. Pole magnetyczne powstaje również wokół każdego przewodnika, w którym płynie prąd elektryczny (także pole magnesu stałego jest wynikiem przepływu tzw. prądów wewnątrzatomowych). Pole magnetyczne nie może być odczuwane naszymi zmysłami, tak jak pole grawitacyjne. Kształt pola magnetycznego możemy zaobserwować wykonując szkolne doświadczenie z opiłkami *żelaza* na kartce papieru, pod którą znajduje się magnes, co ilustruje rys. 2.1 a.



Rys. 2.1. Linie sił pola magnetycznego: a) pole magnesu stałego; b) pole wokół przewodnika z prądem

Linie ułożone z opiłek *żelaza* odzwierciedlające obraz pola nazywamy liniami sił pola magnetycznego. Linie sił tworzą zamknięty obwód, nie mający początku i końca. Kierunek linii na zewnątrz magnesu określa się umownie od bieguna północnego (N), do bieguna południowego (S).

Pole magnetyczne powstające wokół przewodnika, w którym płynie prąd jest polem kołowym (rys. 2.1 b), tzn. linie pola magnetycznego mają postać współśrodkowych okręgów. Zwrot linii pola można wyznaczyć według **reguły śruby prawoskrętnej** (rys. 2.1 b).

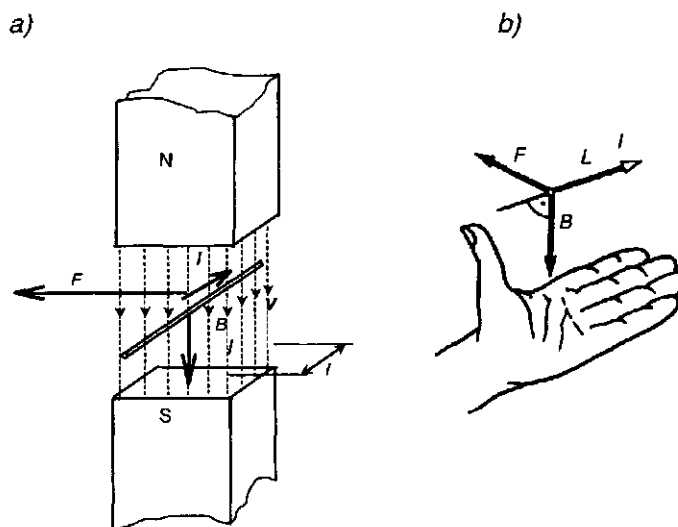
*Jeżeli wkręca się śrubę prawoskrętną tak, by jej posuw był zgodny z kierunkiem przepływu prądu w przewodzie, to obrót śruby wyznacza obieg linii pola.*

Pole magnetyczne, którego linie sił biegą równolegle nazywamy **polem magnetycznym jednorodnym**.

### 2.1.2. Indukcja magnetyczna; powstawanie siły elektrodynamicznej w polu magnetycznym

Jeśli w polu magnetycznym umieścimy przewodnik, w którym płynie prąd elektryczny, na przewodnik ten zacznie działać siła. Kierunek siły możemy wyznaczyć według **reguły lewej dłoni** (rys.2.2 b):

*Jeżeli lewą dłoń usytuujemy w taki sposób, żeby kierunek linii sił pola magnetycznego był skierowany do otwartej dłoni, a cztery palce wskazywały kierunek prądu, to odchylony kciuk będzie wskazywał kierunek i zwrot siły działającej na przewodnik.*



Rys. 2.2. Powstawanie siły elektrodynamicznej w polu magnetycznym: a) siła działająca na przewodnik; b) reguła lewej dłoni

Wielkość siły zależy od natężenia prądu w przewodniku  $I$ , długości  $l$  przewodnika zawartej w polu oraz od cechy pola magnetycznego, którą nazywamy **indukcją magnetyczną  $B$** . Indukcja jest wielkością kierunkową i dlatego przedstawiana jest w postaci wektora.

Jeżeli wektor indukcji  $B$  jest prostopadły do przewodu, to wielkość siły  $F$  wynosi:

$$F = B \cdot I \cdot l \quad (2.1)$$

zatem

$$B = \frac{F}{I \cdot l} \quad (2.2)$$

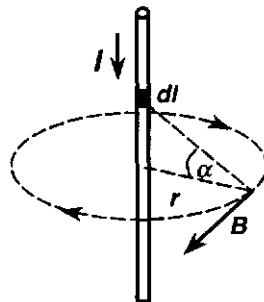
Jednostka indukcji nosi nazwę **tesla (T)**:

$$1 \text{ T} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m} \cdot \text{A}} = 1 \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{A}} = 1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$$

Wektor indukcji magnetycznej w dowolnym punkcie pola magnetycznego jest styczny do linii pola w tym punkcie a zwrot wektora indukcji jest zgodny ze zwrotem linii. Wartość indukcji jest zależna od położenia punktu (w którym obliczamy indukcję) względem przewodu o długości  $dl$ , w którym płynie prąd o wartości  $I$  oraz wielkości charakteryzującej właściwości magnetyczne środowiska. Wartość tę określa **prawo Biota i Savarta** (rys. 2.3):

$$dB = \frac{\mu I dl \sin \alpha}{4 \pi r^2} \quad (2.3)$$

gdzie  $\mu$  - przenikalność bezwzględna środowiska.



Rys. 2.3. Prawo Biota i Savarta

Dla dostatecznie długiego przewodu wartość indukcji w odległości  $r$  obliczonej na podstawie wzoru (2.3) wynosi:

$$B = \frac{\mu I}{2 \pi r} \quad (2.4)$$

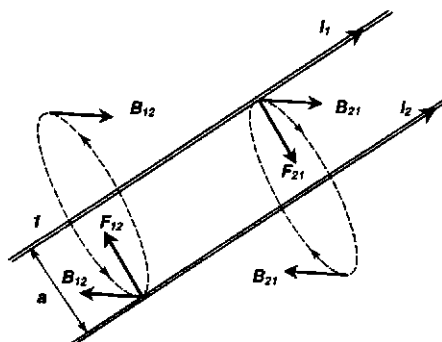
Przenikalność magnetyczną dowolnego materiału najczęściej określamy przenikalnością względną  $f_f$ . Jako przenikalność odniesienia wybrano przenikalność magnetyczną próżni  $f_a$ :

$$\mu_0 = \frac{4\pi}{10^7} = 1,256 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}} \right] \quad (2.5)$$

Przenikalność magnetyczną bezwzględną poszczególnych materiałów będziemy określali:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (2.6)$$

Wzory (2.1 i 2.4) pozwalają na wyznaczenie sił wzajemnego oddziaływania między przewodami, w których płynie prąd elektryczny. Zastosujemy je do przypadku dwóch długich równoległych przewodów (rys. 2.4) umieszczonych w powietrzu ( $f_f = f_a$ ).



Rys. 2.4. Siły wzajemnego oddziaływania przewodników z prądem

Długość przewodów wynosi  $l$ , odległość między nimi jest równa  $a$ , zaś prądy w przewodach odpowiednio  $I_1$  i  $I_2$  (o tych samych kierunkach). Prąd płynący w przewodzie 1 jest źródłem pola magnetycznego, którego indukcja na osi przewodu 2 jest równa:

$$B_{1-2} = \frac{\mu_0 I_1}{2 \pi a}$$

Podobnie prąd  $I_2$  w przewodzie 2 wytwarza na osi przewodu 1 indukcję:

$$B_{2-1} = \frac{\mu_0 I_2}{2 \pi a}$$

Siła działająca na przewód  $l$  jest równa:

$$F_{1-2} = B_{2-1} \cdot I_1 \cdot l$$

Po podstawieniu wartości  $B_{2-1}$  (2.6) otrzymamy: (2.7)

$$F_{1-2} = 2 I_1 \cdot I_2 \frac{l}{a} 10^{-7} N$$

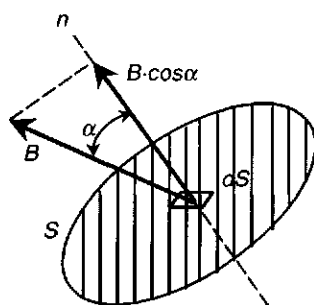
Siła  $F_{2-1}$  działająca na przewód 2 jest równa co do wartości sile  $F_{1-2}$  i ma zwrot przeciwny, a więc przewody przyciągają się. Jeżeli prądy w przewodach będą miały przeciwne kierunki - przewody będą się odpychać.

Opisane powyżej zjawisko posłużyło do wyznaczenia definicji jednostki natężenia prądu - ampera (patrz pkt. 1.1).

## 2.2. Zjawisko indukcji elektromagnetycznej

### 2.2.1. Strumień magnetyczny

W wielu zagadnieniach technicznych, oprócz indukcji stosuje się również wielkość zwaną strumieniem indukcji magnetycznej lub w skrócie strumieniem magnetycznym.



Rys. 2.5. Strumień indukcji magnetycznej przenikający powierzchnię

Elementarny strumień magnetyczny  $d\Phi$ , przenikający powierzchnię elementarną  $dS$  (rys. 2.5), określamy wyrażeniem:

$$d\Phi = B \cdot dS \cdot \cos\alpha \quad (2.8)$$

gdzie  $\alpha$  - kąt między wektorem  $B$  a normalną do powierzchni  $S$ .

Strumień magnetyczny przenikający przez powierzchnię  $S$  wynosi:

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot \vec{dS} \quad (2.9)$$

Jeżeli pole magnetyczne jest jednorodne ( $B = \text{const}$ ), a powierzchnia  $S$  jest prostopadła do wektora indukcji  $B$ , to wyrażenie możemy uprościć:

$$\Phi = B \cdot S \quad (2.10) \text{ Jednostką strumienia jest } \mathbf{weber:}$$

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s} = 1 \text{ Vs}$$

### 2.2.2. Siłą elektromotoryczna indukowana

Zjawisko indukcji elektromagnetycznej, odkryte przez M. Faradaya, jest jednym z najważniejszych zjawisk zachodzących w polu magnetycznym. Jego istota polega na powstawaniu siły elektromotorycznej w dowolnym obwodzie, przy zmianie strumienia magnetycznego skojarzonego z obwodem.

Doświadczenia Faradaya wykazały, że siła elektromotoryczna indukowana  $e$  jest proporcjonalna do zmian w czasie strumienia  $\Phi$  skojarzonego z obwodem, co można zapisać następująco:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.11)$$

W przypadku obwodu jednozwojowego strumień skojarzony  $\Phi$  jest po prostu strumieniem  $\Phi$  objętym tym zwojem. W przypadku uzwojenia o  $z$  zwojach, jeżeli każdy zwoj jest skojarzony z tym samym strumieniem, strumień skojarzony z całym uzwojeniem wynosi:

$$\Psi = z \Phi$$

a zatem

$$e = -z \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.12)$$



Znak minus we wzorze (2.12) wynika z reguły Lenza, zgodnie z którą:

*jakiegokolwiek zmiany strumienia magnetycznego skojarzonego z przewodzącym obwodem zamkniętym powodują powstanie sił elektromotorycznych, przeciwdziałającym zmianom strumienia.*

Siła elektromotoryczna powstaje niezależnie od tego czy zmiana ta wynika z ruchu pola magnetycznego względem obwodu, czy obwodu względem pola (SEM **rotacji**), czy też powodowana jest zmianą strumienia magnetycznego w czasie (SEM **transformacji**).

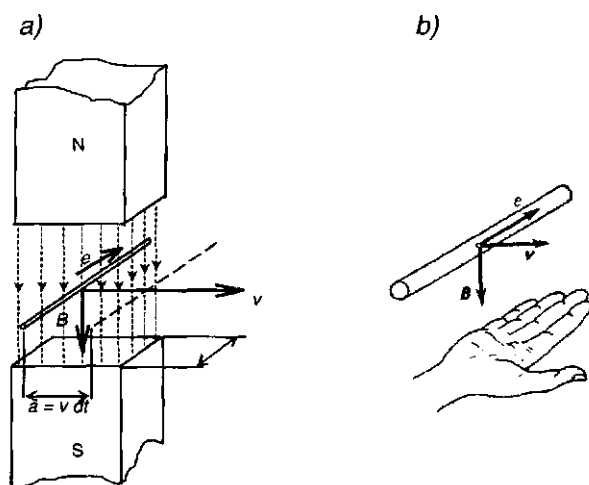
Siła elektromotoryczna rotacji powstaje, gdy mamy do czynienia z ruchem przewodu o długości  $l$  w polu magnetycznym o indukcji  $B$ . Ruch odbywa się z prędkością  $v$ ; kierunki indukcji magnetycznej i prędkości są do siebie prostopadłe (rys. 2.6 a). Z rysunku wynika, że strumień  $d\Phi$  jest przecinany w czasie  $dt$  przez powierzchnię  $\Delta S = a \cdot l$  tworzoną przez poruszający się przewód, zatem będzie równy:

$$d\Phi = B \cdot \Delta S = B \cdot l \cdot a = B \cdot l \cdot v \cdot dt$$

po podstawieniu do wzoru (2.11) otrzymujemy:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{B \cdot l \cdot v \cdot dt}{dt}$$

$$|e| = B \cdot l \cdot v \quad (2.13)$$



Rys. 2.6. Siła elektromotoryczna rotacji w polu magnetycznym: a) indukowanie SEM rotacji; b) reguła prawej dłoni

Kierunek działania SEM może być określony w prosty sposób **regułą prawej dłoni** (rys. 2.6 b) sformułowaną przez J. Fleminga.

*Jeżeli prawą dłoń usytuujemy w taki sposób, żeby kierunek linii sił pola magnetycznego był skierowany do otwartej dłoni, a kciuk wskazywał kierunek ruchu przewodu względem pola, to pozostałe palce wskażą kierunek SEM.*

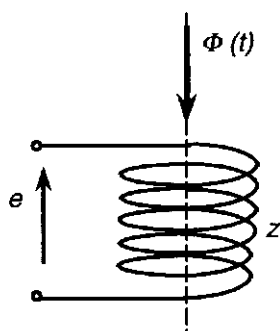
Wyrażenie to jest słuszne, gdy wektor prędkości  $v$  jest prostopadły do kierunku linii sił pola magnetycznego. W ogólnym przypadku, wielkość SEM będzie zależna od kąta  $\alpha$ , pod którym przecinane są linie sił pola magnetycznego:

$$|e| = B \cdot l \cdot v \cdot \sin \alpha \quad (2.14)$$

Siła elektromotoryczna transformacji powstaje, jeśli uzwojenie o ilości zwojów  $z$  zostaje umieszczone w polu magnetycznym o zmiennym w czasie strumieniu  $\Phi(t)$ . Przedstawione to zostało na rys. 2.7.

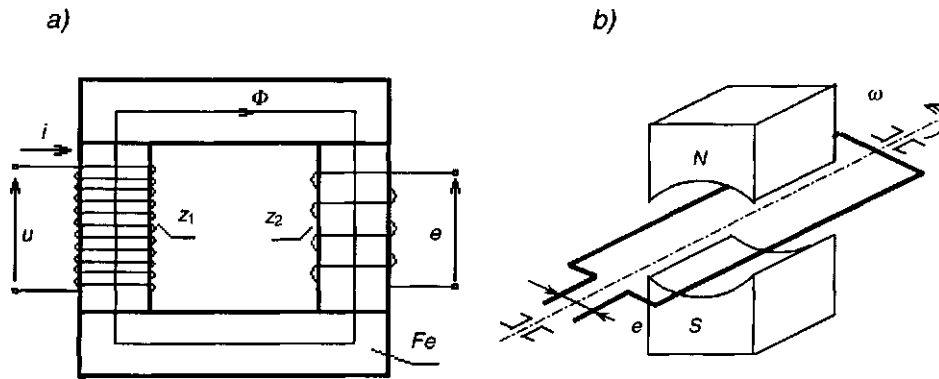
Siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniu zgodnie ze wzorem (2.12) wyniesie:

$$e = -z \frac{d[\Phi(t)]}{dt} \quad (2.15)$$



Rys. 2.7. Siła elektromotoryczna transformacji w polu magnetycznym

Zastosowanie powyższych rozważań w praktyce ilustruje rys. 2.8.



Rys. 2.8. Przykłady indukowania siły elektromotorycznej w polu magnetycznym:  
 a) SEM transformacji indukowana w transformatorze,  
 b) SEM rotacji indukowana w maszynie elektrycznej

## 2.3. Magnesowanie ciał

### 2.3.1. Natężenie pola magnetycznego

Oprócz indukcji magnetycznej, do opisu niektórych właściwości pola magnetycznego stosuje się wielkość  $H$  zwaną **natężeniem pola magnetycznego**. Jest to wielkość charakteryzująca pole magnetyczne niezależnie od własności magnetycznych środowiska. Możemy ją wyodrębnić dzieląc indukcję  $B$  przez przenikalność magnetyczną  $\mu$ :

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (2.16)$$

Wówczas dla przykładu pola magnetycznego wytwarzanego przez prostoliniowy przewodnik z prądem, opisanego wyrażeniem (2.4), otrzymamy wzór:

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (2.17)$$

Z doświadczeń wiadomo także, że uzwojenie cylindryczne o  $z$  zwojów i długości  $l$  wytwarza na osi uzwojenia natężenie pola magnetycznego o wartości:

$$H = \frac{I \cdot z}{l} \quad (2.18)$$

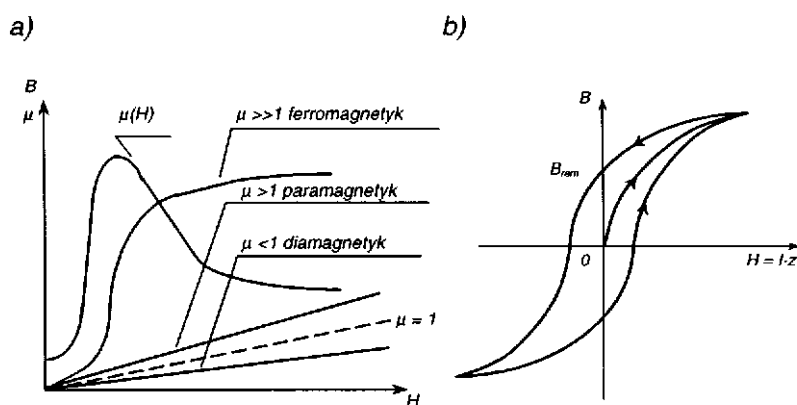
Jednostką natężenia pola magnetycznego jest A/m.

Podobnie jak indukcja, natężenie pola jest również wielkością wektorową. Zgodnie z zależnościami (2.6 i 2.16):

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (2.19)$$

Ciała, dla których  $\mu_r < 1$  (np. srebro, miedź) nazywane są **diamagnetykami**. Natomiast ciała, dla których  $\mu_r > 1$  (np. platyna, aluminium) nazywane są **paramagnetykami** (w obu przypadkach  $\mu_r$  nieznacznie różni się od jedności). Materiały para- lub diamagnetyczne nieznacznie wzmacniają lub osłabiają pole magnetyczne. **Materiały ferromagnetyczne** znacznie różnią się od wymienionych powyżej, gdyż posiadają  $\mu_r = 10^3$ -s- $10^5$ . Ferromagnetyki znacznie wzmacniają pole magnetyczne.

Zależność (2.19) dla różnych materiałów przedstawia rys. 2.9 a. Na rysunku tym umieszczono również zależność  $B(H)$  dla ferromagnetyków. Dla ferromagnetyków są to zależności nieliniowe, zarówno  $B(H)$  jak i



Rys. 2.9. Magnesowanie ciał: a) charakterystyki magnesowania ciał; b) pętla histerezy magnetycznej

### 2.3.2. Magnesowanie ferromagnetyków

Krzywe  $B = f(H)$  dla ferromagnetyków najczęściej uzyskuje się na drodze pomiarowej. Jeżeli weźmiemy sztabkę materiału ferromagnetycznego (np. stal), na który nawiniemy uzwojenie o liczbie zwojów  $z$  i będziemy przepuszczali prąd  $I$ , zwiększając jego wartość począwszy od 0, to zauważymy, że indukcja  $B$  (oraz strumień magnetyczny  $\Phi$ ) będzie zmieniać się jak na wykresie, przedstawionym na rys. 2.9 b.

Liczba spolaryzowanych elementarnych cząstek magnetycznych (nazywanych domenami) w żelazie rośnie wraz z wielkością zewnętrznego natężenia pola wytworzonego przez uzwojenie. Dla pewnej wartości  $H$  żelazo zostanie całkowicie spolaryzowane (domeny zorientują się w jednym kierunku), indukcja  $B$  stabilizuje się, stan ten nazywa się nasyceniem magnetycznym. Przy powolnym zmniejszaniu  $H$ , indukcja magnetyczna nie będzie przebiegała po linii pierwotnego magnesowania, lecz będzie malała jak gdyby z opóźnieniem. Po zmniejszeniu natężenia pola do zera okazuje się, że w ferromagnetyku istnieje jeszcze indukcja  $B_{Km}$  zwana pozostałością magnetyczną lub indukcją szczątkową. Ferromagnetyk stał się magnesem trwałym. Podobny przebieg  $B(H)$  otrzymamy zmieniając prąd / w odwrotnym kierunku, czyli  $-H$ . Charakterystyka  $B(H)$  będzie przebiegała po liniach zewnętrznych, a nie po linii pierwotnego magnesowania. Tak powstała pętla jest nazywana **pętlą histerezy magnetycznej** rozumianą jako graniczna pętla histerezy magnetycznej dla danego materiału.

Ferromagnetyki znajdują zastosowanie w elektrotechnice przede wszystkim tam, gdzie potrzebne jest wytworzenie dużego strumienia magnetycznego. Ferromagnetyki o małej pozostałości magnetycznej nazywane są **ferromagnetykami miękkimi** (należą do nich czyste żelazo, miękka stał oraz stopy żelaza z krzemem lub niklem). Są stosowane w obwodach magnetycznych elektromagnesów, transformatorów i maszyn elektrycznych, w których po wyłączeniu prądu strumień magnetyczny powinien zanikać. **Ferromagnetyki twarde** (specjalne rodzaje stali oraz spieki) charakteryzują się dużą pozostałością magnetyczną i są stosowane do wykonywania magnesów trwałych.

## 2.4. Obwody magnetyczne

### 2.4.1. Siłą magnetomotoryczna

Obwody magnetyczne są wykorzystane w wielu konstrukcjach maszyn i aparatów elektrycznych, takich jak prądnice i silniki elektryczne, transformatory, elektromagnesy itp.

Strumień magnetyczny w obwodzie magnetycznym jest wzbudzany (wymuszony) siłą magnetomotoryczną  $\mathcal{F}$ . Siła magnetomotoryczna (używany często skrót - SMM) jest odpowiednikiem siły elektromotorycznej w polu elektrycznym a wytwarzana jest przez pole magnetyczne magnesu trwałego lub wskutek przepływu prądu elektrycznego.

Siła magnetomotoryczna jest proporcjonalna do natężenia prądu elektrycznego / i ilości zwojów z cewki wytwarzającej pole.

Jednostką siły magnetomotorycznej jest A (stąd potoczna nazwa SMM - amperozwoje):

$$\Theta = I \cdot z \quad (2.20)$$

#### 2.4.2. Prawo Ampere'a. Napięcie magnetyczne

Prawo Ampere'a dotyczące siły magnetomotorycznej jest wyrażane w postaci wyrażenia:

$$\Theta = \sum (H \cdot l) \quad (2.2) \text{ gdzie:}$$

$H$  – natężenie pola magnetycznego  $\left[ \frac{\text{A}}{\text{m}} \right]$ ,

$l$  – długość drogi obwodu magnetycznego [m].

Wyrażenie  $H \cdot l$  zwane jest napięciem magnetycznym  $U_m$  między dwoma punktami obwodu magnetycznego:

$$U_m = H \cdot l \quad (2.22)$$

Ze wzoru (2.21) siła magnetomotoryczna  $\Theta$  jest sumą wszystkich napięć wzdłuż zamkniętego obwodu magnetycznego (analogiczne do II prawa Kirchhoffa).

#### 2.4.3. Reluktancja

W obwodach magnetycznych obowiązują prawa, które przez formalne podobieństwo do praw obowiązujących w obwodach elektrycznych zostały nazwane prawami Ohma i Kirchhoffa dla obwodów magnetycznych.

Prawo Ohma dla obwodu magnetycznego wyraża się wzorem:

$$\Phi = \frac{SMM}{R_m} = \frac{I \cdot z}{R_m} = \frac{\Theta}{R_m}$$

gdzie  $R_m$  jest cechą obwodu magnetycznego nazywaną **reluktancją**:

$$R_m = \frac{\Theta}{\Phi} \quad (2.24) \text{ Jednostką reluktancji jest}$$

A/Vs.

Reluktancja jest zależna od wymiarów i materiału części obwodu:

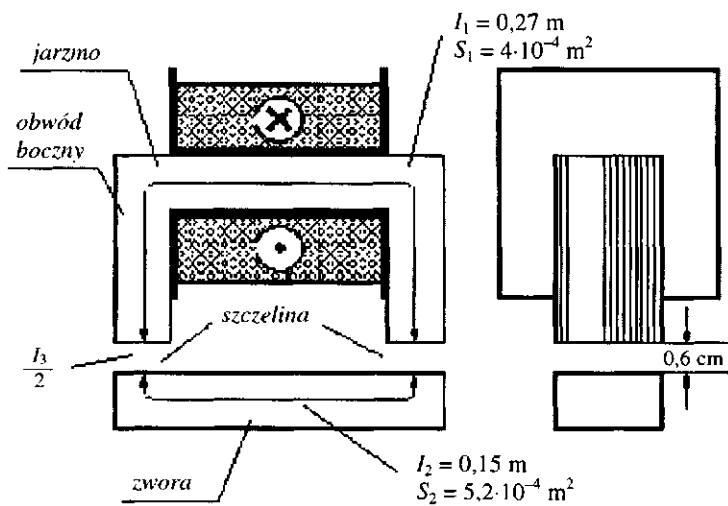
$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot S} \quad (2.25)$$

me:

- / - długość drogi magnetycznej,
- $S$  - przekrój poprzeczny obwodu,
- $\mu$  - przenikalność bezwzględna materiału.

#### 2.4.4. Obliczanie obwodów magnetycznych

Obliczanie obwodu magnetycznego polega na znalezieniu wartości SMM zdolnej do wytworzenia żądanej wartości strumienia magnetycznego  $\Phi$ , przy danej lub obliczonej reluktancji całego obwodu.



Rys. 2.10. Wymiary elektromagnesu

W przedstawionym na rys. 2.10 zwymiarowanym obwodzie magnetycznym zakładamy, że wymagany strumień  $\Phi = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ Wb}$  i jest on ukierunkowany (przepływa) w:

- jarżmie o obwodzie  $l_1$  i przekroju  $S_1$ ,
- zworze o długości  $l_3$  i przekroju  $S_3$ ,
- dwóch szczelinach powietrznych o grubości  $\frac{l_3}{2}$  i przekroju  $S_3$ .

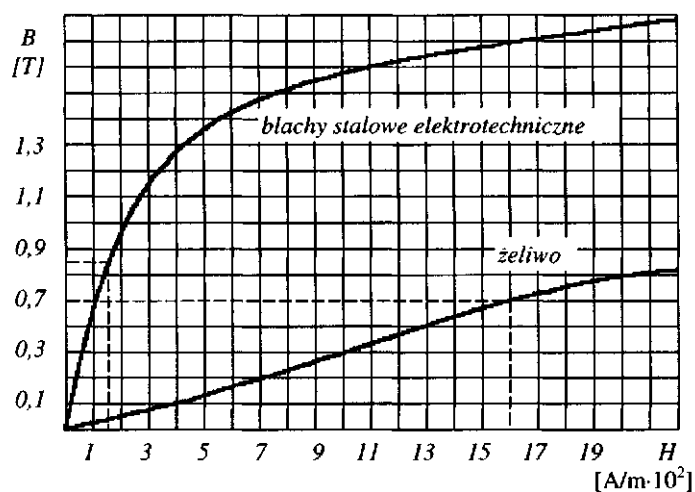
Wychodząc z zależności:

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

obliczymy indukcję w poszczególnych częściach obwodu (wyniki obliczeń ujęto w tabeli 2.1 ). Korzystając z zależności:

$$\Theta = \sum H \cdot l$$

znajdziemy siłę magnetomotoryczną, jednak wcześniej niezbędne jest znalezienie natężenia pola magnetycznego  $H$  w ustalonych częściach obwodu magnetycznego. Wielkość tą odczytujemy z wykresu  $B - f(H)$  dla danego materiału ferromagnetycznego (rys. 2.11).



Rys. 2.11. Krzywe magnesowania stali elektrotechnicznej i żeliwa Dla

szczeliny powietrznej określamy:

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{B}{1,256 \cdot 10^{-6}} = \frac{0,65}{1,256 \cdot 10^{-6}} = 0,517 \cdot 10^6 \frac{A}{m}$$



Tabela 2.1

Część obwodu	Materiał	Przekrój poprzeczny $S$ [m <sup>2</sup> ]	Strumień magnetyczny $\Phi$ [Wb]	Indukcja magnetyczna $B$ [T]
Szczelina	powietrze	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	0,65
Jarzmo	blacha elektr.	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	0,65
Obwód boczny	blacha elektr.	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	0,65
Zwora	żeliwo	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	0,5

W tabeli 2.2 umieszczono wyniki obliczeń natężenia pola i napięć magnetycznych w poszczególnych częściach obwodu.

Tabela 2.2

Część obwodu	Materiał	Długość obwodu $L$ [m]	Indukcja magnet. $B$ [T]	Natężenie pola $H$ [A/m]	$U_m = H \cdot l$ [Az]
1	blacha el.	$l_1 = 0,27$	0,65	150	$U_{m1} = 40,5$
2	żeliwo	$l_2 = 0,15$	0,5	1600	$U_{m2} = 240$
3	powietrze	$l_3 = 0,012$	0,65	$0,517 \cdot 10^6$	$U_{m3} = 6210$

Całkowita siła magnetomotoryczna wynosi:

$$\Theta = U_{m1} + U_{m2} + U_{m3} = 6490,5 \text{ Az}$$

Wynik ten można osiągnąć stosując dowolny wariant liczby zwojów  $z$  i natężenia prądu  $I$ , np.:

$$\begin{aligned} I &= 1 \text{ A} & z &= 6490 & \Theta &= 6490 \text{ Az} \\ I &= 10 \text{ A} & z &= 649 & \Theta &= 6490 \text{ Az} \end{aligned}$$

Powyższe obliczenia były wykonane przy założeniu danego strumienia  $\Phi$  oraz wymiarów elektromagnesu. Można również wykonać obliczenia wychodząc z danych takich, jak np. siła przyciągania zwory przez elektromagnes. Dla zilustrowania tego w powyższym przykładzie obliczmy siłę  $F$  elektromagnesu. Wynosi ona:

$$F = \frac{S}{2\mu_0} B^2 \quad (2.26)$$

Wstawiając do wzoru dane dla szczeliny powietrznej elektromagnesu  $B = 0,65\text{T}$ ,  $S = 4,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$  oraz  $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ V}\cdot\text{s}/\text{A}\cdot\text{m}$  otrzymamy, że siła  $F$  jest równa 67 N.

## 2.5. Zjawisko samoindukcji

Jeżeli w dowolnym obwodzie płynie prąd, to jest on źródłem pola i strumienia magnetycznego skojarzonego z tym obwodem. Jeżeli prąd będzie się zmieniał w czasie, to strumień będzie również się zmieniał, co spowoduje powstanie siły elektromotorycznej. Siłę tę nazywamy **siłą elektromotoryczną indukcji własnej**, lub samoindukcji a proces jej powstawania **zjawiskiem samoindukcji**.

W celu wyznaczenia strumienia magnetycznego  $\Phi$  wytworzonego przez uzwojenie o  $z$  zwojach i reluktancji  $R_m$ , w którym płynie prąd  $i$ , można posłużyć się prawem Ohma dla obwodu magnetycznego podanego we wzorze (2.4):

$$\Phi = \frac{z \cdot i}{R_m} \quad (2.27)$$

Strumień skojarzony  $\Psi$  z uzwojeniem w przypadku, gdy wszystkie zwoje są skojarzone ze strumieniem  $\Phi$ , wynosi:

$$\Psi = z \cdot \Phi$$

Podstawiając wartość strumienia  $\Phi$  do równania (2.27) otrzymamy:

$$\Psi = \frac{z^2 \cdot i}{R_m}$$

Z równań (2.27) i (2.28) wynika, że jeżeli reluktancja  $R_m$  jest stała, to strumienie  $\Phi$  i  $\Psi$  są proporcjonalne do prądu  $i$  (zachodzi to w przypadku uzwojenia bez rdzenia ferromagnetycznego). Stosunek strumienia skojarzonego  $\Psi$  do prądu  $i$  wywołującego ten strumień nazywamy **indukcyjnością własną** i oznaczamy przez  $L$ :

$$L = \frac{\Psi}{i} = \frac{z^2}{R_m} \quad (2.29)$$

Jednostką indukcyjności własnej jest **henr** (H):

$$1 \text{ H} = 1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}}$$

Silę elektromotoryczną indukcji własnej  $e_L$  wyznaczamy korzystając z podstawowego równania (2.14):

$$e_L = -\frac{d\Psi}{dt} = \frac{d(L \cdot i)}{dt}$$

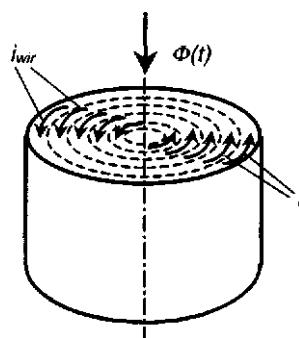
Jeżeli indukcyjność jest stała, to:

$$e_L = -L \frac{di}{dt} \quad (2.30)$$

Zgodnie z regułą Lenza dodatni przyrost prądu powoduje powstanie ujemnej SEM indukcji własnej, która powoduje prąd ujemny przeciwdziałający wzrostowi prądu dodatniego.

## 2.6. Prądy wirowe

Prądy wirowe powstają w metalach znajdujących się w zmiennym polu magnetycznym. Zjawisko prądów wirowych można łatwo objaśnić na przykładzie rdzenia o przekroju kołowym (rys. 2.12), który ze względu na symetrię osiową można podzielić na szereg cienkościennych współosiowych rur, stykających się ze sobą. Zmienny strumień magnetyczny, objęty przez poszczególne rury, indukuje w nich siły elektromotoryczne, a pośrednio prądy.



Rys. 2.12. Powstawanie prądów wirowych

Prądy wirowe są źródłem strat mocy w rdzeniach maszyn i urządzeń elektrycznych. Ogranicza się je stosując składanie rdzeni z blach odizolowanych od siebie. Im mniejsza jest grubość blachy, tym mniejszy jest w niej strumień magnetyczny i mniejsza indukowana siła elektromotoryczna. Jednocześnie rośnie rezystancja dla prądów wirowych, ponieważ zmniejsza się przekrój, po którym one płyną.

Ponadto przez dodawanie krzemu do stali (od 2,5 do 4,5%) można zwiększyć około pięciokrotnie rezystywność stali, co również zmniejsza wartość prądów wirowych.

Do budowy maszyn elektrycznych i transformatorów stosuje się blachy o grubości od 0,35 do 0,5 mm.

Zjawisko prądów wirowych może być również nie tylko źródłem strat, ale może być także efektywnie wykorzystane, np. w piecach indukcyjnych rdzeniowych do topienia metali oraz w hamulcach elektromagnetycznych wiropędowych stosowanych w niektórych napędach.

### 3. Obwody prądu przemiennego

#### 3.1. Prąd przemienny - pojęcia podstawowe

##### 3.1.1. Prądy zmienne

Prądy elektryczne można klasyfikować przyjmując jako kryterium przebieg natężenia prądu w funkcji czasu. Prąd elektryczny o stałym natężeniu i zwrocie nazywamy prądem stałym, a o natężeniu zmieniającym się w czasie - prądem zmiennym. Jedną z licznych odmian prądu zmiennego jest **prąd sinusoidalnie zmienny** (nazywany też **prądem przemiennym sinusoidalnym**). Jest to prąd okresowo zmienny o przebiegu

$$i = I_m \sin (2 \pi f t + \psi) \quad (3.1)$$

gdzie:

$i$  - wartość chwilowa prądu (wartość w danej chwili),  $I_m$  - wartość maksymalna prądu (zwana też **amplitudą**),  $f$  - częstotliwość zmiany prądu,  $\psi$  - faza początkowa (faza w chwili  $t = 0$ ).

Jednostką częstotliwość  $f$  jest **herc** (Hz):

$$1 \text{ Hz} = \frac{1}{\text{s}}$$

Okres  $T$  zmiany prądu wynosi:

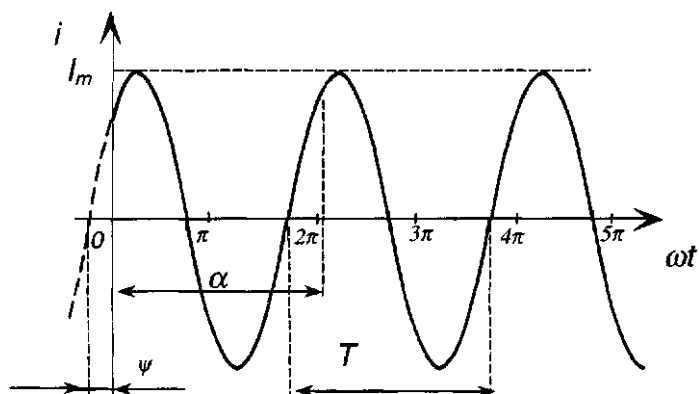
$$T = \frac{1}{f} \text{ [s]} \quad (3.2)$$

Stosuje się również inny zapis:

$$i = I_m \sin (\omega t + \psi) \quad (3.3)$$

gdzie wielkość  $(\omega = 2 \pi f)$  zwana jest **pulsacją prądu**.

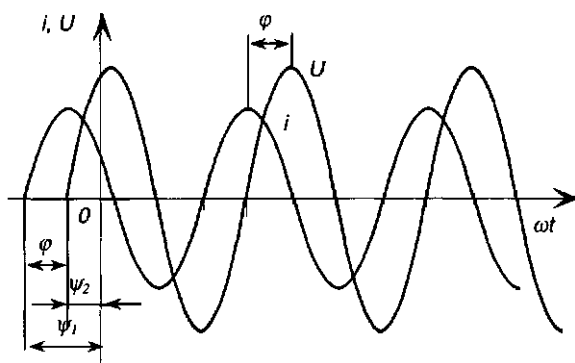
Interpretację graficzną tego zapisu przedstawia rys 3.1.



Rys. 3.1. Wykres prądu sinusoidalnego w funkcji czasu

Kąt  $\alpha$  odpowiadający określonej wartości chwilowej (rys. 3.1) nazywamy **fazą** albo **kątem fazowym**. Wszystkie powyższe określenia dotyczą również siły elektromotorycznej  $e$  i napięcia  $u$  oraz zmieniających się sinusoidalnie. Faza początkowa oznaczana jako  $\psi$  jest fazą w chwili  $t = 0$ . Dwie wielkości sinusoidalnie zmienne (np. prąd i napięcie) mogą różnić się fazami początkowymi (rys. 3.2). Kąt będący różnicą faz początkowych określany jest jako **kąt przesunięcia fazowego** i oznaczany przez  $\varphi$ . Dla przebiegów z rys. 3.2:

$$\varphi = \psi_2 - \psi_1$$



Rys. 3.2. Przebieg liniowy prądu i napięcia przesuniętych w fazie

### 3.1.2. Wartość średnia i skuteczna prądu przemiennego

Zmienność sinusoidalna prądu w czasie utrudnia prowadzenie różnego rodzaju obliczeń elektrycznych, prostych w przypadku prądu stałego. Naturalną konsekwencją tego jest dążenie do wprowadzenia w obliczeniach wartości zastępczej - równoważnego prądu stałego dla danego prądu sinusoidalnego. Wprowadzenie jednej uniwersalnej wartości zastępczej nie jest niestety możliwe i wartość zastępcza musi być różnie definiowana w zależności od tego do jakich obliczeń ma służyć.

Jeżeli obliczenia dotyczą ładunku elektrycznego związanego z przepływem prądu, to posługujemy się **wartością średnią**, którą definiujemy:

$$I_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T i dt \quad (3.4)$$

Dla przebiegu sinusoidalnie zmiennego wartość średnia wynosi 0. Analizując przebieg sinusoidalny wyprostowany dwupołówkowo, można posłużyć się wartością średnią wyznaczoną dla połowy okresu:

$$I_{sr} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = \frac{2 I_m}{T} (-\cos \omega t) \Big|_0^{T/2} = \frac{2}{\pi} I_m$$

$$I_{sr} = \frac{2}{\pi} I_m \approx 0,637 I_m$$

W rozważaniach energetycznych prąd sinusoidalny zastępujemy równoważnym prądem stałym, który nazywamy **wartością skuteczną** danego prądu sinusoidalnego i oznaczamy - podobnie jak wartość prądu stałego - literą  $I$ . Ten równoważny prąd stały ma wydzielić na rezystorze  $R$  w ciągu czasu  $T$  taką samą energię cieplną, jak dany prąd sinusoidalny.

Korzystając z tego sformułowania można napisać:

$$R I^2 T = \int_0^T R i^2 dt$$

z czego otrzymujemy:

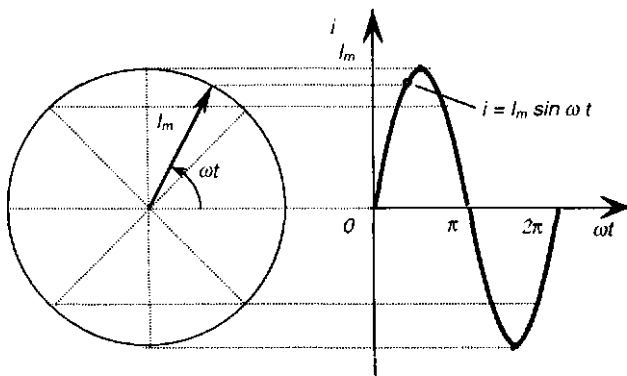
$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \sqrt{\frac{I_m^2}{2}}$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 I_m \quad (3.6)$$

Pojęcia wartości średniej i skutecznej stosujemy także do napięć i sił elektromotorycznych.

### 3.1.3. Zapis wektorowy prądu sinusoidalnego

Dotychczasowe rozważania dotyczyły zapisu prądu w postaci funkcji trygonometrycznej. Przebieg dowolnej wielkości sinusoidalnie zmiennej można przedstawić za pomocą wektora wirującego ze stałą prędkością kątową.



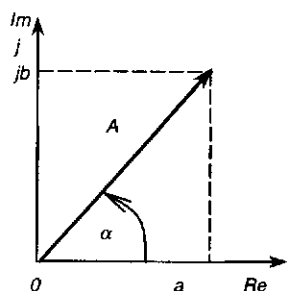
Rys. 3.3. Postać wektorowa prądu sinusoidalnego

Na rysunku 3.3 przedstawiono wektor o wartości  $I_m$ , wirujący z prędkością kątową  $\omega = 2\pi f$ . Wektor przedstawiający wielkość elektryczną nazywany jest (dla odróżnienia od innych wektorów) **wskazem** (lub fazorem). Wskazy podobnie jak wektory można dodawać, odejmować itd. Na wykresach wskazowych wielkości przedstawiane są w „stanie zatrzymanym” (na ogół w chwili  $t = 0$ ). W praktyce posługujemy się wskazami o długości równej wartości skutecznej (a więc mniejszymi od wartości maksymalnej  $I_m$ ). Wartość chwilową prądu reprezentuje składowa pionowa wirującego wektora.

### 3.1.4. Zapis symboliczny prądu sinusoidalnego

Przedstawienie wielkości sinusoidalnych w postaci wektorów na płaszczyźnie umożliwia wprowadzenie do obliczeń obwodów prądów sinusoidalnych liczb zespolonych (metody symbolicznej), co znacznie upraszcza te obliczenia.





Rys. 3.4. Przedstawienie liczby zespolonej na płaszczyźnie zmiennej zespolonej

Dowolny wektor, np.  $A$  na płaszczyźnie zmiennej zespolonej (rys. 3,4) można przedstawić jako liczbę zespoloną:

$$\underline{A} = a + j b \quad \text{gdzie} \quad j = \sqrt{-1}$$

Moduł i argument liczby zespolonej wynikają z rys. 3.2:

$$|A| = \sqrt{a^2 + b^2} \quad \alpha = \text{arc tg} \frac{b}{a}$$

Liczbę zespoloną można przedstawić także w postaci trygonometrycznej, która bezpośrednio wynika z rys. 3.2:

$$\underline{A} = |A| \cos \alpha + j |A| \sin \alpha$$

lub wykładniczej (korzystając ze wzoru Eulera):

$$\underline{A} = |A| e^{j\alpha}$$

W zapisie funkcji zmiennej zespolonej przebieg prądu ze wzoru (3.3) będzie wynosił:

$$\underline{I(t)} = I_m e^{j(\omega t + \psi)} \quad (3-7)$$

## 3.2. Obwody prądu przemiennego

### 3.2.1. Rezystancja $R$ w obwodzie prądu przemiennego

Jeżeli obwód z rezystancją  $R$  będziemy zasilać napięciem  $u = U_m \sin \omega t$ , jak pokazano na rys. 3.5 a, to w obwodzie popłynie prąd  $i$  (zgodnie z prawem Ohma) również sinusoidalny:

$$i = I_m \cdot \sin \omega t$$

Napięcie  $U_R$  na rezystancji  $R$  będzie wynosić:

$$u_R = i \cdot R = I_m \cdot R \cdot \sin \omega t$$

Przyjmijmy:  $I_m \cdot R = U_{Rm}$

$$u_R = U_{Rm} \cdot \sin \omega t$$

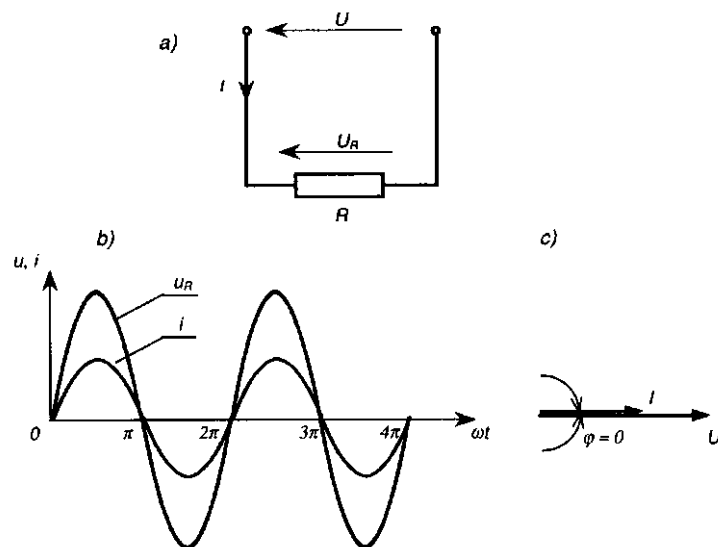
zatem:

(3.8)

Dla wartości skutecznych prądu  $i$  i napięcia:

$$U_R = I \cdot R \quad (3.9)$$

Zgodnie z II prawem Kirchhoffa napięcie  $U_R$  jest równe napięciu zasilania  $u$ .



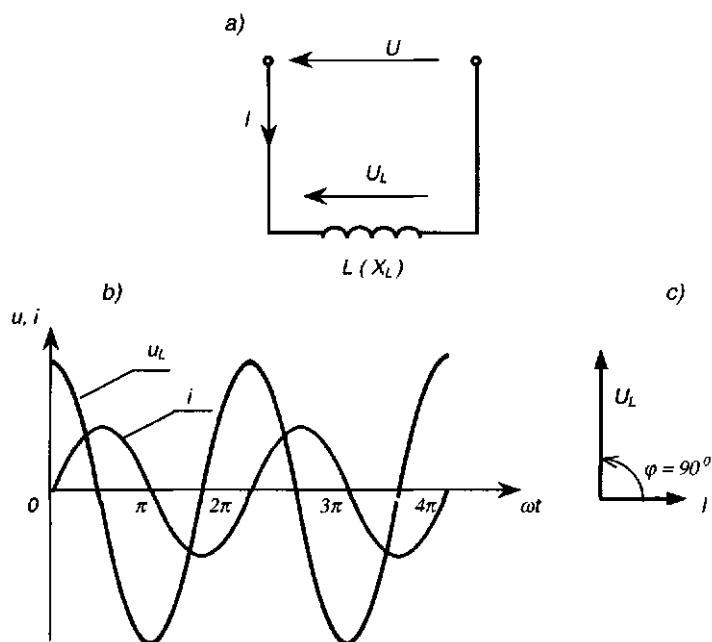
Rys.3.5. Obwód prądu przemiennego z rezystancją: a) schemat; b) wykres czasowy prądu i napięcia; c) wykres wskazowy napięcia i prądu

Z powyższego wynika, że napięcie na rezystancji w obwodzie jest sinusoidalne i zmienia się z taką samą częstotliwością jak natężenie prądu. Przebiegi funkcji  $U_R = R \cdot i$  i  $i = I_m \sin \omega t$  względem osi czasu są takie same, tzn. że **są w fazie**. Na wykresie wektorowym widzimy, że przesunięcie fazowe  $\varphi$  (kąt fazowy pomiędzy wektorami prądu i napięcia) jest równe zero.

Napięcie  $U_R$  oraz natężenie prądu  $i$  w obwodzie z rezystancją  $R$  są w fazie, tzn.  $\varphi = 0$ .

### 3.2.2. Indukcyjność $L$ w obwodzie prądu przemiennego

Jeżeli przez element obwodu o idealnej indukcyjności  $L$  (taka czysta indukcyjność w praktyce nie występuje) przepływa prąd przemienny wyrażony równaniem  $i = I_m \sin \omega t$ , to na indukcyjności  $L$  zaindukuje się siła elektromotoryczna  $e_L$  przeciwstawiająca się zmianom prądu (patrz pkt. 2.5). Możemy zatem przyjąć, że na indukcyjności  $L$  występuje napięcie  $U_L$  o wartości równej sile elektromotorycznej  $-e_L$ . Przebiegi prądu i napięcia  $U_L$  przedstawia rys. 3.6.



Rys. 3.6. Obwód prądu przemiennego z indukcyjnością: a) schemat; b) wykres czasowy prądu i napięcia; c) wykres wskazowy napięcia i prądu

Napięcie na indukcyjności  $L$  wynosi:

$$u_L = L \cdot \frac{di}{dt}$$

stąd:

$$u_L = L \cdot I_m \frac{d}{dt} (\sin \omega t) = L \omega I_m \cos \omega t = L \omega I_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

Przyjmując:

$$U_{Lm} = L \omega I_m \quad (3.10) \text{ Otrzymujemy:}$$

$$u = U_{Lm} \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (3-11)$$

Przebieg napięcia  $u_L$  jest sinusoidalny, posiada taką samą częstotliwość jak prąd i oraz wyprzedza przebieg prądu o kąt  $90^\circ$ :

$$\varphi_L = \frac{\pi}{2}$$

*W obwodzie prądu przemiennego napięcie na indukcyjności -wyprzedza prąd o  $90^\circ$ .*

Z wyrażenia (3,10) wynika:

$$U_{Lm} = \omega L \cdot I_m$$

Wyrażenie  $\omega L$  jest nazywane **reaktancją indukcyjną**  $X_L$ :

$$X_L = \omega L = 2\pi \cdot f \cdot L \quad [\Omega] \quad (3.12) \text{ zatem:}$$

$$U_{Lm} = I_m \cdot X_L$$

a dla wartości skutecznych prądu i napięcia:

$$U_L = I \cdot X_L \quad (3-13)$$

Należy zauważyć, że reaktancja indukcyjna jest zależna od częstotliwości/ (np. dla prądu stałego, gdy  $\omega = 0$ , to  $X_L = 0$ ).

Odwrotność reaktancji indukcyjnej nazywamy **susceptancją indukcyjną**  $B_L$  i określamy wzorem:

$$B_L = \frac{1}{X_L} = \frac{1}{\omega L} \quad (3.14)$$

### 3.2.3. Pojemność $C$ w obwodzie prądu przemiennego

Jeżeli kondensator o pojemności  $C$  włączymy w obwód prądu przemiennego zasilany napięciem  $u = U_m \sin \omega t$ , to ładunek  $q$  na zaciskach kondensatora będzie się zmieniał sinusoidalnie zgodnie z zależnością:

$$q = C u = C U_m \sin \omega t$$

Prąd  $i$ , jaki popłynie w obwodzie, będzie miał wartość:

$$i = C \frac{du}{dt} = C \cdot U_m \cdot \frac{d}{dt} \sin \omega t = U_m \cdot \omega \cdot C \cdot \cos \omega t$$

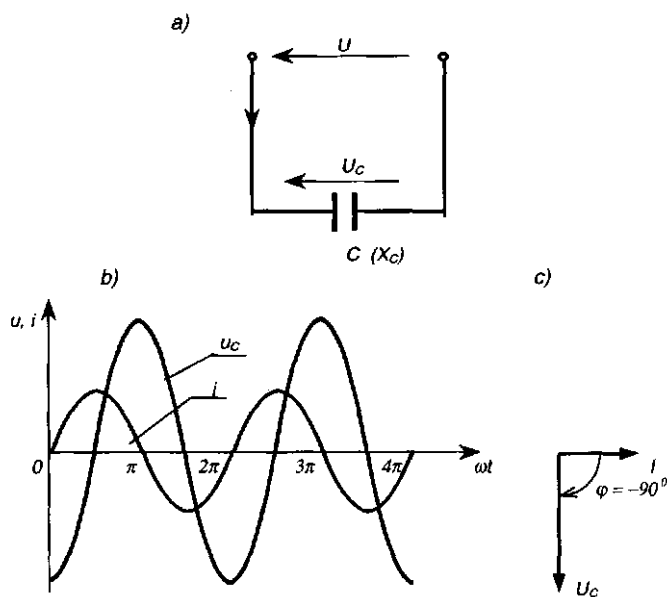
$$i = U_m \omega C \cdot \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) = I_m \cdot \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

gdzie:  $I_m = U_m \omega C$       lub       $I_m = \frac{U_m}{\frac{1}{\omega C}}$       (3.15)

Przebiegi prądu i napięcia są sinusoidalne i posiadają tę samą częstotliwość. Kąty fazowe obydwu wielkości różnią się o  $90^\circ$ :

$$\varphi_{ic} = \frac{\pi}{2}$$

Przebiegi prądu i napięcia w tym obwodzie przedstawia rys. 3,7.



Rys.3.7. Obwód prądu przemiennego z pojemnością: a) schemat; b) wykres czasowy prądu i napięcia; c) wykres wskazowy napięcia i prądu

*W obwodzie prądu przemiennego z pojemnością napięcie na pojemności opóźnia się w stosunku do prądu o kąt  $90^\circ$ , lub inaczej - prąd wyprzedza napięcie o  $90^\circ$ .*

Jeżeli przyjmiemy:

$$X_c = \frac{1}{\omega C}$$

to:

$$I_m = \frac{U_m}{\frac{1}{\omega C}} = \frac{U_m}{X_c}$$

Wyrażenie  $X_c$  jest nazywane **reaktancją pojemnościową**:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad [\Omega] \quad (3.16)$$

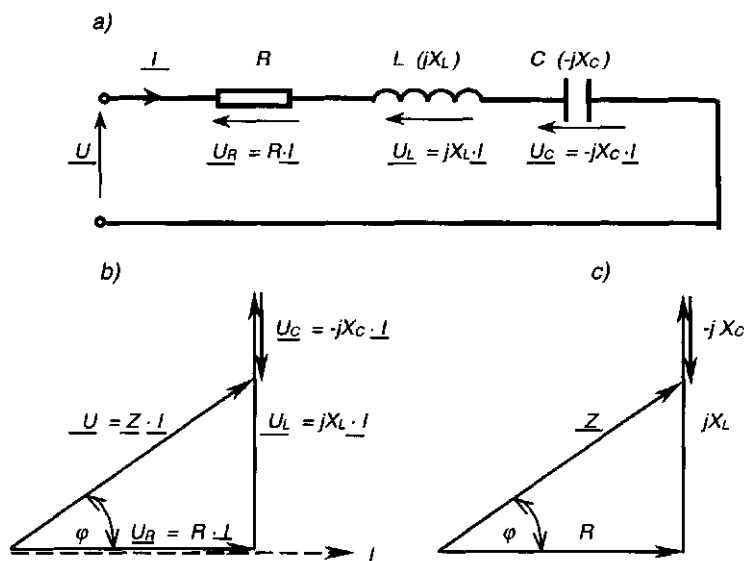
Reaktancja pojemnościowa  $X_c$  jest odwrotnie proporcjonalna do częstotliwości (np. dla prądu stałego  $\omega = 0$ , to  $X_c = \infty$ ).

Odwrotność reaktancji pojemnościowej nazywamy **susceptancją pojemnościową**  $B_c$  i określamy wzorem:

$$B_c = \frac{1}{X_c} = \omega C \quad (3.17)$$

### 3.2.4. Obwód z szeregowo połączonymi elementami $R$ , $L$ i $C$

W obwodzie elektrycznym prądu stałego z szeregowo połączonymi rezystancjami, spadki napięć dodają się arytmetycznie. W obwodzie elektrycznym prądu przemiennego z szeregowo połączonymi elementami  $R$ ,  $L$  i  $C$  (rys. 3.8), spadki napięć na rezystancji  $R$  oraz reaktancjach  $X_L$  i  $X_C$  należy dodawać stosując rachunek wektorowy lub symboliczny, gdyż są one w różnych fazach.



Rys.3.8. Obwód szeregowy  $R$ ,  $L$ ,  $C$  prądu przemiennego: a) schemat; b) wykres wskazowy napięć; c) wykres wskazowy parametrów obwodu

Wynika to z zależności omówionych uprzednio oraz z następującego rozumowania. Przez wszystkie elementy przepływa ten sam prąd  $I$ . Napięcie na rezystancji  $R$  wynosi  $U_R = I \cdot R$  i jest w fazie z prądem, napięcie na reaktancji indukcyjnej  $X_L$  wynosi  $U_L = I \cdot X_L$  i wyprzedza prąd  $I$  o  $90^\circ$ , natomiast napięcie na reaktancji  $X_C$  wynosi  $U_C = I \cdot X_C$  i opóźnia się w stosunku do prądu o kąt  $90^\circ$ .

Stosując zapis funkcji zmiennej zespolonej, wartości prądu i napięć wynoszą:

$$\begin{aligned} \text{napięcie na rezystancji} & \quad \underline{U}_R = R \cdot \underline{I} \\ \text{napięcie na reaktancji } X_L & \quad \underline{U}_L = j X_L \cdot \underline{I} \\ \text{napięcie na reaktancji } X_C & \quad \underline{U}_C = -j X_C \underline{I} = -j \frac{1}{\omega C} \underline{I} \end{aligned}$$

Napięcie  $U$  zasilające obwód (zgodnie z II prawem Kirchhoffa) wynosi:

$$\begin{aligned} \underline{U} &= \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C = R \cdot \underline{I} + j X_L \cdot \underline{I} - j X_C \cdot \underline{I} \\ U &= I [R + j(X_L - X_C)] \end{aligned}$$

Całkowite napięcie  $U$  może być również przedstawione jako napięcie na zastępczym parametrze obwodu nazywanym **impedancją  $Z$** :

$$\underline{U} = \underline{I} \cdot \underline{Z} \quad (3.18) \text{ Impedancją zespoloną } Z \text{ jest}$$

wyrażona wzorem:

$$\underline{Z} = R + j(X_L - X_C) \quad (3.19) \text{ a jej moduł może być}$$

przedstawiony wzorem:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (3.20)$$

W obwodach prądu przemiennego obowiązują prawa Ohma i Kirchhoffa, ale uzyskują one szerszy, bardziej uniwersalny charakter.

Prawo Ohma:

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}} \quad (3.21)$$

I prawo Kirchhoffa:

$$\begin{aligned} \sum \underline{I} &= 0 \quad (3.22) \text{ II prawo Kirchhoffa:} \\ \sum \underline{E} + \sum \underline{U} &= 0 \end{aligned}$$

Należy zwrócić uwagę na uniwersalny charakter wzorów (3.21 - 3.23), ponieważ w obwodach prądu stałego, gdy wielkości nie zależą od czasu, mamy jednoczesną równość wartości chwilowej, średniej i skutecznej.



We wszystkich elementach wykresu wskazowego napięć (rys. 3.8 b) występuje wspólna wartość natężenia prądu  $I$ . Możemy zatem podzielić wszystkie wartości napięć przez  $I$  i otrzymamy wykres wskazowy parametrów obwodu pokazany na rys. 3.8 c.

Kąt przesunięcia fazowego ( $\varphi$  można na podstawie rys. 3.8 c obliczyć ze wzoru:

$$\varphi = \arccos \frac{R}{Z} \quad (3.24)$$

W obwodzie elektrycznym tego rodzaju może się zdarzyć, że napięcia na reaktancjach  $X_L$  i  $X_C$ , tzn.  $U_L$  i  $U_C$  będą większe od całkowitego napięcia  $U$ . W szczególnym przypadku układ może uzyskać charakter czysto rezystancyjny, tzn. gdy kąt  $\varphi = 0$ . Wystąpi to wówczas, gdy  $U_L = U_C$ , co jest równoznaczne z równością  $X_L = X_C$ . Zachodzi wtedy równość:

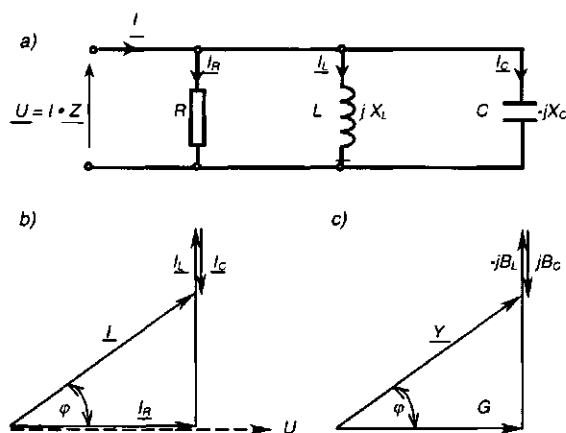
$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}$$

Równość ta będzie spełniona przy częstotliwości:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.25)$$

Przypadek ten nazywamy **rezonans szeregowym** lub **rezonans napięć**, a częstotliwość  $f_r$  częstotliwością rezonansową.

### 3.2.5. Obwód z równolegle połączonymi elementami $R$ , $L$ i $C$



Rys. 3.9. Obwód równoległy  $R, L, C$  prądu przemiennego: a) schemat; b) wykres wskazowy prądów; c) wykres wskazowy przewodności

W równoległym układzie  $RLC$  (przedstawionym na rys. 3.9) możemy napisać na podstawie I prawa Kirchhoffa:

$$\underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_L + \underline{I}_C = \frac{\underline{U}}{R} - j \frac{\underline{U}}{\omega L} + j \frac{\underline{U}}{\omega C}$$

$$\underline{I} = \underline{U} \left[ \frac{1}{R} + j \left( \frac{1}{\omega C} - \frac{1}{\omega L} \right) \right]$$

W tym przypadku na rezystancji  $R$  oraz reaktancjach  $X_L$  i  $X_C$  występuje ta sama wartość napięcia  $U$ . Wprowadzając pojęcie odwrotności impedancji - **admitancji** ( $Y$ ) otrzymamy:

Admitancja zespolona wynosi: 
$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} \quad (3.26)$$

$$\underline{Y} = G + j(B_C - B_L) \quad (3.27)$$

a jej moduł jest równy: 
$$Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2} \quad (3.28)$$

Wykres wskazowy prądów sporządzamy wychodząc od wskazu  $U$  (rys. 3.9 b). Na podstawie równania (3.27) otrzymamy wykres wskazowy przewodności poszczególnych elementów (rys. 3.9 c).

Kąt fazowy obliczamy na podstawie rys. 3.9 c korzystając z zależności:

$$\cos \varphi = \frac{G}{Y} \quad (3.29)$$

Prądy w gałęziach równoległych  $I_L$  i  $I_C$  mogą przybierać wartość większą niż sumaryczny prąd  $I$ . W przypadku  $I_L = I_C$ , tzn.  $X_L = X_C$  prąd całkowity będzie  $I = I_R$  i będzie to wartość minimalna. Zachodzi to gdy:

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}$$

Równość ta będzie spełniona przy częstotliwości rezonansowej:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.30)$$

Taki stan nazywamy **rezonansem równoległym lub rezonansem prądów**.

### 3.3. Moc prądu elektrycznego przemiennego

#### 3.3.1. Pojęcie mocy w obwodzie prądu przemiennego

W obwodach prądu stałego moc, wyrażana iloczynem prądu i napięcia (niezmiennych w czasie) była wielkością stałą. W obwodach prądu zmiennego moc określana iloczynem wartości chwilowych prądu i napięcia jest zmienna w czasie i nosi nazwę **mocy chwilowej**. Jeżeli przyjmiemy, że przebiegi napięcia i prądu w obwodzie (rys. 3.10a) zmieniają się zgodnie z zapisem (dla uproszczenia przyjęto, że fazy początkowe  $\varphi_u$  i  $\varphi_i$ ; przebiegów są równe zero):

$$u = U_m \sin \omega t$$

$$i = I_m \sin (\omega t + \varphi)$$

to moc chwilowa; wynosi:

$$p = u \cdot i = U_m \cdot I_m \sin \omega t \cdot \sin (\omega t + \varphi)$$

a po przekształceniu trygonometrycznym i wprowadzeniu wartości skutecznych prądu i napięcia:

$$p = \frac{U_m \cdot I_m}{2} [\cos \varphi - \cos (2\omega t - \varphi)]$$

$$p = U \cdot I [\cos \varphi - \cos (2\omega t - \varphi)] \quad (3.31)$$

W wyrażeniu (3.31) można wyodrębnić dwie składowe:

- składową stałą, niezależną od czasu:

$$U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (3.32)$$

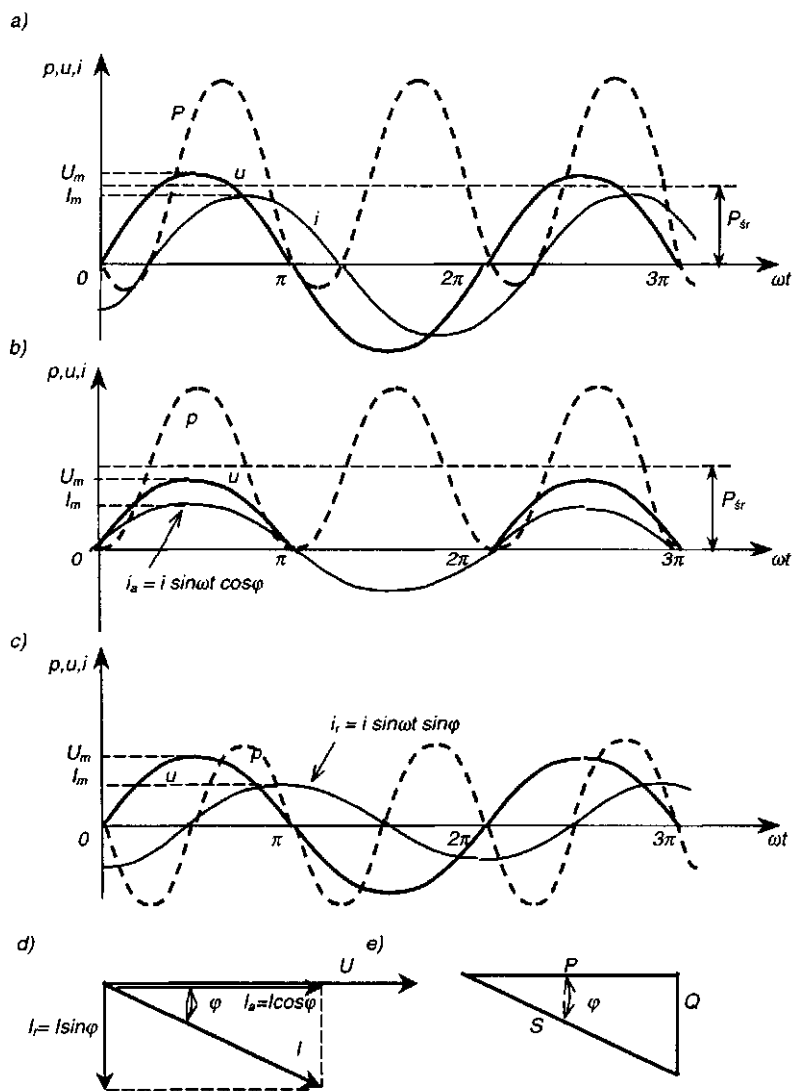
- oraz składową zmienną o częstotliwości dwukrotnie większej od częstotliwości napięcia i prądu:

$$U \cdot I \cdot \cos (2\omega t - \varphi) \quad (3.33) \text{ Praca wykonana w czasie } t$$

wynosi:

$$W = \int_0^t p \, dt \quad (3.34) \text{ zatem jest proporcjonalna do}$$

powierzchni pod krzywą mocy chwilowej.



Rys. 3.10. Moc w obwodzie prądu przemiennego:  
 a) schemat obwodu; b) przebiegi czasowe prądu, napięcia i mocy;  
 c) wykres wskazowy napięcia i prądów; d) trójkąt mocy

Wartość średnia mocy chwilowej w okresie  $T$  nazywana jest **mocą czynną**, oznaczana jako  $P$  i wynosi:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \, dt = \frac{1}{T} \int_0^T U \cdot I [\cos \varphi - \cos (2\omega t - \varphi)] \, dt$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (3.35)$$

Z porównania wzorów (3.32) i (3.35) wynika, że moc czynna jest równa składowej stałej mocy chwilowej.

Z rysunku 3.10 a wynika, że moc chwilowa w niektórych miejscach przebiegu ma wartość ujemną co *oznacza*, że energia przesyłana jest wówczas z odbiornika do źródła energii. Istnieje więc część energii elektrycznej, wytwarzana przez pewną moc, oscylująca między odbiornikiem a źródłem nie wykorzystywana w odbiorniku. Ten rodzaj mocy nazwano umownie **mocą bierną** i oznaczono przez  $Q$ .

Jeżeli przebieg prądu / rozłożymy na dwie składowe (zilustrowane zostało to na wykresie wskazowym na rys. 3.10 d):

- składową  $I_a$  zwaną składową czynną zgodną w fazie z przebiegiem napięcia:

$$I_a = I \cdot \cos \varphi \quad (3.36)$$

- oraz składową  $I_r$  zwaną składową bierną, przesuniętą w fazie względem napięcia o kąt  $90^\circ$ :

$$I_r = I \cdot \sin \varphi \quad (3.37)$$

to jak widać z rys. 3.10 b moc chwilowa będąca iloczynem składowej czynnej prądu i napięcia jest zawsze dodatnia, zatem zawsze płynie od źródła do odbiornika, a jej wartość średnia jest równa mocy czynnej  $P$ . Natomiast na rys. 3.10 c wartość chwilowa przebiegu iloczynu składowej biernej prądu i napięcia jest symetryczna względem osi czasu (a jej wartość średnia jest równa 0), zatem energia oscyluje między źródłem i odbiornikiem. Dochodzimy więc do konkluzji, że moc czynna jest mocą generowaną przez składową czynną prądu a moc bierna- przez składową bierną prądu. Wartość mocy biernej jest równa:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (3.38)$$

Ze wzorów (3.35 i 3.38) wynika, że moce czynna i bierna sumują się geometrycznie tworząc moc wypadkową nazywaną **mocą pozorną**, oznaczaną  $S$ . Moc pozorna jest wyrażana jako iloczyn wartości skutecznych prądu i napięcia:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.39)$$

$$S = U \cdot I \quad (3.40)$$

Moce czynna, bierna i pozorna tworzą trójkąt prostokątny tzw. **trójkąt mocy**, którego jeden z kątów ostrych jest równy kątowi ( $p$ ) (rys. 3.10 e). Wyrażenie  $\cos(p)$  nosi nazwę **współczynnika mocy**.

Do obliczenia mocy możemy stosować również zapis symboliczny. Jeżeli przebieg prądu i napięcia przedstawimy w postaci zespolonej:

$$\underline{I} = I \cdot e^{-j\omega t}$$

$$\underline{U} = U \cdot e^{j(\omega t + \varphi)}$$

to moc zespolona jest iloczynem wartości zespolonych prądu i napięcia:

$$\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I} = U \cdot I \cdot e^{j((\omega t + \varphi) - \omega t)} = U \cdot I \cdot e^{j\varphi} \quad (3.41)$$

lub 
$$\underline{S} = U \cdot I \cdot \cos \varphi + j U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (3.42)$$

$$S = P + j Q \quad (3.43)$$

Jak widzimy moc zespolona w obwodzie jest mocą pozorną i składa się z części rzeczywistej  $P$  - mocy czynnej oraz części urojonej  $Q$  - mocy biernej.

Jednostką mocy czynnej, tak jak w obwodach prądu stałego, jest wat (W), natomiast jednostką mocy biernej jest **war** (var). Wymiarowo jest on równy watowi, a stosowany jest wyłącznie dla podkreślenia biernego charakteru mocy:

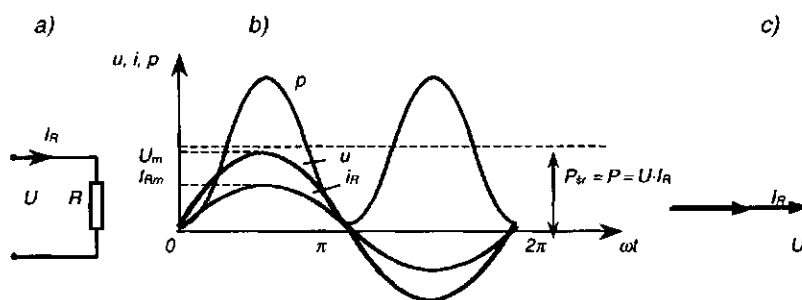
$$1 \text{ var} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A}$$

Jednostką mocy pozornej jest **woltoamper** (VA). Wymiarowo jest on równy watowi, a stosowany jest wyłącznie dla odróżnienia charakteru mocy pozornej od pozostałych rodzajów mocy:

$$1 \text{ VA} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A}$$

### 3.3.2. Moc w obwodach prądu przemiennego

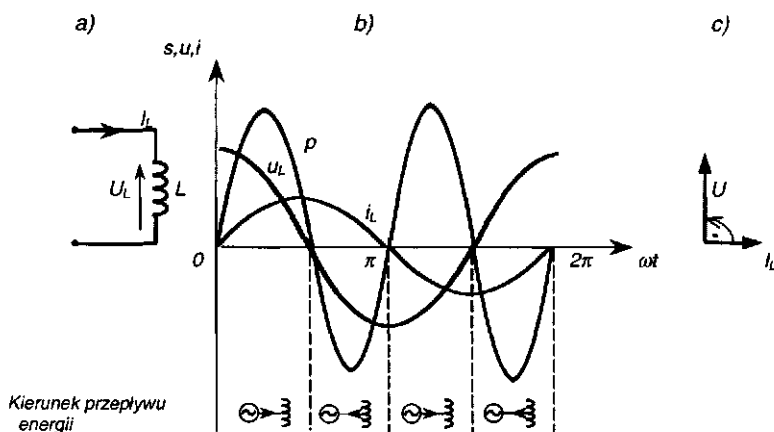
Schemat obwodu prądu przemiennego zawierający tylko rezystancję oraz przebiegi napięcia, prądu i mocy pokazuje rys. 3.11.



Rys. 3.11. Moc w obwodzie z rezystancją: a) schemat obwodu; b) przebiegi czasowe prądu napięcia i mocy; c) wykres wskazowy

W obwodzie płynie tylko składowa czynna prądu  $I_a = I_R$ . Ponieważ kąt  $\varphi = 0$ , na podstawie wzoru (3.38) moc bierna  $Q$  w obwodzie jest równa 0, a moc  $P_R$  wydzielana na rezystancji jest równa mocy czynnej w obwodzie  $P$ :

$$P_R = U \cdot I_R \cdot \cos \varphi = U \cdot I_R \quad (3.44)$$



Rys. 3.12. Moc w obwodzie z indukcyjnością: a) schemat obwodu; b) przebiegi czasowe prądu napięcia i mocy; c) wykres wskazowy

Jeżeli obciążeniem obwodu elektrycznego jest tylko idealna **indukcyjność  $L$** , to prąd elektryczny opóźnia się w stosunku do napięcia o kąt  $n/2$ , tj. o  $90^\circ$ . Prąd ten nazywamy prądem biernym  $I_q$  lub prądem biernym indukcyjnym  $I_L$  jak pokazano na rys. 3.12. Ponieważ kąt  $\varphi = n/2$  ( $\cos \varphi = 0$ ), na podstawie wzoru (3.35) moc czynna  $P$  jest równa 0, zatem indukcyjność pobiera tylko moc bierną  $Q$ . Moc ta nie może być źródłem energii cieplnej ani mechanicznej (stąd nazwa - moc bierna), nazywana jest **mocą bierną indukcyjną** i oznaczana symbolem  $Q_L$

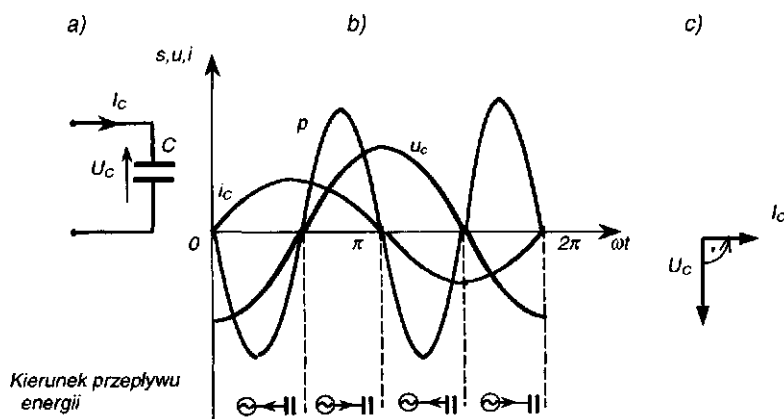
$$Q_L = U \cdot I \cdot \sin \varphi = U \cdot I_L \quad (3.45)$$

Moc chwilowa w tym układzie jest dodatnia w pierwszej ćwiartce okresu, ujemna w drugiej ćwiartce itd. W pierwszej ćwiartce okresu energia jest pobierana przez indukcyjność ze źródła energii (prądnicy), w drugiej ćwiartce energia jest przekazywana od indukcyjności do źródła energii itd. Energia ta jest więc wielkością pulsującą pomiędzy indukcyjnością obwodu  $L$  i źródłem energii elektrycznej.

Jeżeli obciążeniem obwodu elektrycznego jest idealna pojemność  $C$ , to prąd elektryczny wyprzedza napięcie o kąt  $n/2$ , tj. o  $90^\circ$ . Prąd ten nazywamy prądem biernym pojemnościowym  $I_q$  lub  $I_c$ , jak pokazano na rys. 3.13.

Podobnie jak w obwodzie z indukcyjnością, moc czynna jest równa zero. Moc chwilowa jest dodatnia i ujemna w poszczególnych ćwiartkach okresu, jak to widać z rys. 3.13. Pulsująca energia pomiędzy pojemnością a źródłem energii jest wytwarzana przez **moc bierną pojemnościową**, oznaczana jako  $Q_C$ :

$$Q_C = U \cdot I \cdot \sin \varphi = U \cdot I_C \quad (3.46)$$



Rys. 3.13. Moc w obwodzie z pojemnością: a) schemat obwodu; b) przebiegi czasowe prądu napięcia i mocy; c) wykres wskazowy

W praktyce bardzo często mamy do czynienia z obwodem o charakterze indukcyjno-czynnym. Przebiegi czasowe prądu, napięcia i mocy takiego obwodu zostały przedstawione na rys. 3.10.

Moc źródeł prądu przemiennego oraz urządzeń przesyłowych energii (np. prądnice, transformatory itp.) jest podawana w postaci mocy pozornej, natomiast moc odbiorników energii - w postaci mocy czynnej.

Współczynnik mocy ( $\cos(p)$ ) zależy od rodzaju odbiorników. Odbiorniki pobierające wyłącznie moc czynną (np. grzejniki, żarówki) mają współczynnik mocy równy jedności. Natomiast urządzenia zawierające obwody magnetyczne (silniki elektryczne, transformatory, elektromagnesy i inne) są odbiornikami mocy czynnej i biernej indukcyjnej; ich współczynnik mocy jest mniejszy od jedności. Zbyt duży pobór mocy biernej indukcyjnej w stosunku do mocy czynnej powoduje, że współczynnik mocy ma małą wartość. Sytuacja taka jest niekorzystna, gdyż stwarza konieczność stosowania w elektrowniach urządzeń

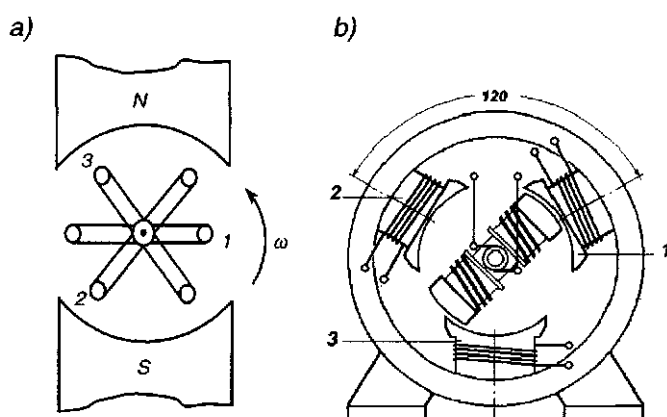


wytwórczych o mocach pozornych o wiele większych niż zapotrzebowana moc użyteczna. Ponadto moc bierna przesyłana z elektrowni do odbiorców powoduje zwiększenie strat mocy czynnej i spadki napięcia w liniach przesyłowych. Dlatego wytwórcy energii wymuszają na odbiorcach (np. przez podwyżki taryfy za zbyt mały  $\cos(\varphi)$ ) ograniczenie niepotrzebnego poboru mocy biernej. W zakładach przemysłowych w tym celu stosuje się kompensację mocy biernej indukcyjnej przez włączanie na stacjach transformatorowo-rozdziałczych baterii kondensatorów. Moc bierna pojemnościowa ma przeciwny znak niż moc bierna indukcyjna i zmniejsza całkowite zapotrzebowanie mocy biernej:

$$Q = Q_L - Q_C$$

### 3.4. Układy trójfazowe prądu przemiennego

Układy trójfazowe są stosowane przede wszystkim w systemach energetycznych tam, gdzie jest wytwarzana, przesyłana i przetwarzana znaczna moc elektryczna. SEM w układzie trójfazowym, tak jak w jednofazowym prądzie przemiennym, jest generowana zarówno co do wielkości jak i kierunku, zgodnie z prawem indukcji. Może to być zrealizowane przez obracające się uzwojenie w stałym polu magnetycznym (rys.3.14 a), lub oddziaływanie wirującego pola magnetycznego na nieruchome uzwojenia (rys.3.14 b).

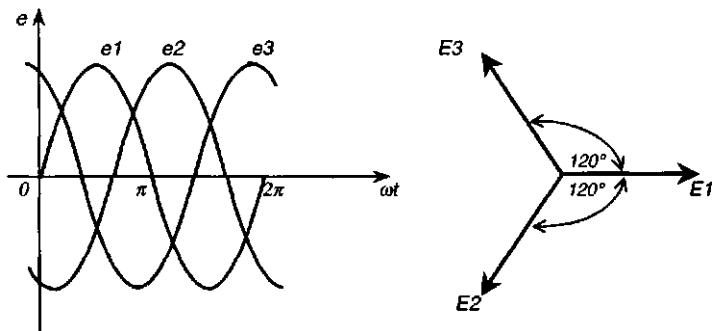


Rys. 3.14. Zasada wytwarzania prądu trójfazowego

W poszczególnych uzwojeniach fazowych (1, 2, 3) indukują się siły elektromotoryczne  $e_1, e_2, e_3$ . Siły te mają tę samą częstotliwość, ale są przesunięte względem siebie w fazie o  $120^\circ$  ( $2/3T$ ):

$$\begin{aligned}
 e_1 &= E_{m1} \cdot \sin(\omega t) \\
 e_2 &= E_{m2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \\
 e_3 &= E_{m3} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right)
 \end{aligned}
 \tag{3.47}$$

Przebiegi czasowe oraz wykres wskazowy SEM przedstawia rys. 3.15.



Rys. 3.15. Przebiegi czasowe i wykres wskazowy SEM trójfazowych

W poszczególnych uzwojeniach fazowych wytworzą się napięcia i M/), które nazywamy **napięciami fazowymi**:

$$\begin{aligned}
 u_{f1} &= U_{m1} \cdot \sin(\omega t) \\
 u_{f2} &= U_{m2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \\
 u_{f3} &= U_{m3} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right)
 \end{aligned}$$

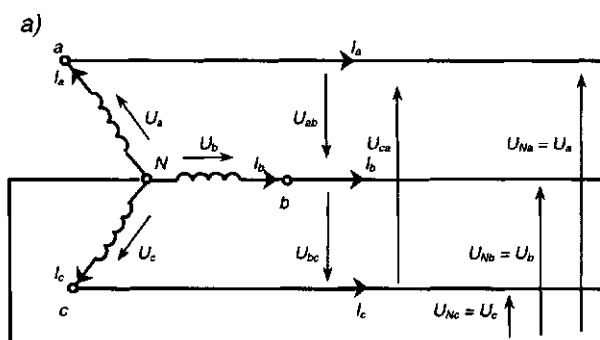
Odprowadzanie i przesyłanie energii elektrycznej trójfazowej jak na rys. 3.14 wymaga sześciu przewodów. Układ taki nazywamy **układem nieskojarzony m**. W praktyce możemy zredukować ilość przewodów przez odpowiednie połączenie ze sobą poszczególnych faz, tworząc **układ trójfazowy skojarzony**. Podobnie jak łączone są szeregowo i równoległe elementy rezystancyjne, uzwojenia trójfazowe łączymy:

- w **trójkąt** i oznaczamy  $\Delta$ ,
- w **gwiazdę** i oznaczamy  $\star$ .

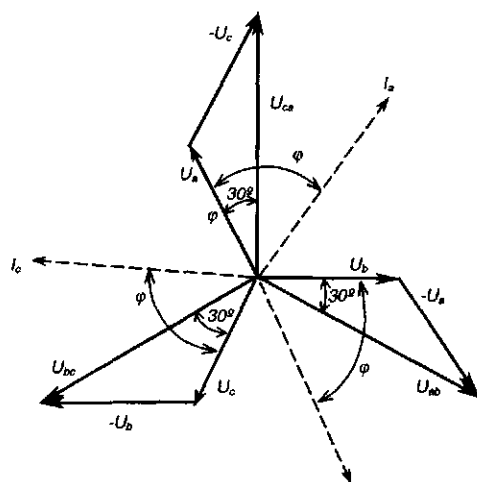
Obwody trójfazowe, w których napięcia fazowe  $U_{fb}$ ,  $U_p$ ,  $U^{\wedge}$  są sobie równe, obciążenie we wszystkich fazach jest jednakowe a także przesunięcia fazowe jednakowe, nazywamy **obwodami symetrycznymi**. W praktyce bardzo często występują obwody, w których jest zachowana symetria napięć, ale obciążenia nie są symetryczne.

### 3.4.1. Połączenie w gwiazdę

W tym przypadku trzy końce uzwojeń fazowych są łączone w jeden punkt (rys. 3.16 a) nazywany **punktem zerowym gwiazdy** (oznaczany przez  $N$ ), podczas gdy początki uzwojeń są wyprowadzone do zacisków wyjściowych.



b)



Rys. 3.16. Napięcia i prądy w układzie trójfazowym połączonym w gwiazdę: a) połączenie w gwiazdę; b) wykres wskazowy prądów; c) wykres wskazowy napięć

Napięcia występujące na uzwojeniach fazowych są **napięciami fazowymi** a napięcia między przewodami fazowymi noszą nazwę **napięć międzyprzewodowych**. Natomiast prądy w uzwojeniach fazowych nazywamy **prądami fazowymi** a prądy w przewodach fazowych - **prądami przewodowymi**.

Na podstawie rys 3.16 a stwierdzamy, że **prąd fazowy jest równy przewodowemu**, co pominąwszy wskaźniki faz zapisuje się w postaci:

$$I = I_f \quad (3-49)$$

Zależność pomiędzy napięciami fazowymi i przewodowymi możemy wyznaczyć na podstawie rys. 3.16 c i II prawa Kirchhoffa:

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_b - \underline{U}_a$$

$$\underline{U}_{bc} = \underline{U}_c - \underline{U}_b$$

$$\underline{U}_{ca} = \underline{U}_a - \underline{U}_c$$

Wartość napięcia międzyfazowego można wyznaczyć na podstawie rys. 3.16 c. Oznaczając wartość napięć fazowych jako  $U_f$ , a napięć międzyfazowych -  $U$ , otrzymamy:

$$U = 2U_f \cdot \cos 30^\circ = 2 \cdot U_f \cdot \frac{1}{2} \cdot \sqrt{3}$$

$$U = \sqrt{3} \cdot U_f \quad (3.51)$$

### 3.4.2. Połączenie w trójkąt

Połączenie w trójkąt uzyskujemy przez szeregowe łączenie uzwojeń trzech faz w obwód zamknięty jak na rys. 3.17 a, a z punktów połączenia wyprowadzamy trzy przewody zwane **przewodami fazowymi**. Taki układ połączeń nazywa się **układem trójfazowym trój przewodowym**.

Jak wynika z rysunku przy połączeniu w trójkąt **napięcia międzyfazowe są równe napięciom fazowym**, co pominąwszy wskaźniki faz zapisuje się w postaci:

$$U = U_f \quad (3.52)$$

W układzie symetrycznym napięcia fazowe mają jednakowe wartości skuteczne i są przesunięte względem siebie w fazie co  $120^\circ$  (rys. 3.16 b). Ich suma

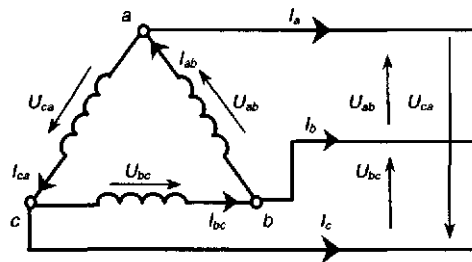
jest więc równa zero, zatem w zamkniętym obwodzie trójkąta abc nie powodują przepływu żadnego prądu.

Jeżeli układ nie jest obciążony (prądy  $i_a$ ,  $i_b$ , oraz  $i_c$  są równe zero), to w uzwojeniach symetrycznego źródła napięcia trójfazowego prąd nie płynie.

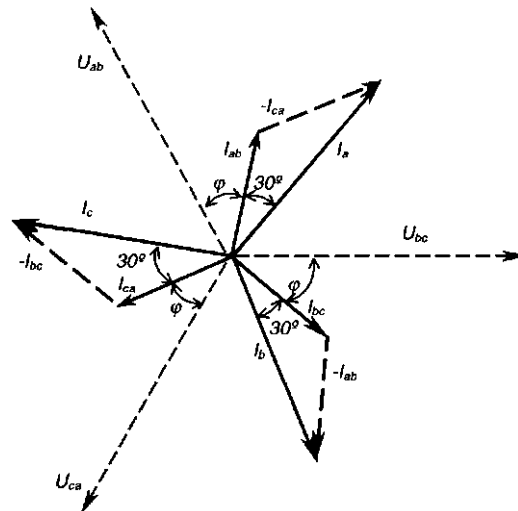
Zależność pomiędzy prądami przewodowymi  $I_a, I_b, I_c$ , oraz  $I_c$  a prądami fazowymi  $I_{ab}, I_{bc}$  oraz  $I_{ca}$  możemy określić na podstawie rys. 3.17 b i I prawa Kirchhoffa:

$$\begin{aligned} \underline{I}_a &= \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} \\ \underline{I}_b &= \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} \\ \underline{I}_c &= \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} \end{aligned} \quad (3.53)$$

a)



b)



Rys. 3.17. Napięcia i prądy w układzie trójfazowym połączonym w trójkąt: a) połączenie w trójkąt; b) wykres wskazowy napięć i prądów

Wartość prądu przewodowego można wyznaczyć na podstawie rys. 3.17 c. Oznaczając wartość prądów fazowych jako //, a prądów przewodowych - /, otrzymamy:

$$I = 2 \cdot I_f \cdot \cos 30^\circ = 2 \cdot I_f \cdot \frac{1}{2} \cdot \sqrt{3} \quad I = \sqrt{3} I_f \quad (3.54)$$

55)

### 3.4.3. Moc elektryczna w trójfazowym układzie prądu przemiennego

Niezależnie od układu połączeń trzech faz, w każdej z nich występuje napięcie  $U_f$  i płynący przez nią prąd // oraz współczynnik mocy  $\cos \varphi_f$ , a zatem w każdej fazie jest wydzielana określona powyższymi parametrami moc czynna P:

$$P_f = U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi \quad (3.56)$$

Jak wiemy, moc czynna posiada wartość tylko dodatnią. Moc układu trójfazowego określamy jako sumę mocy poszczególnych faz:

$$P_{3f} = P_{f1} + P_{f2} + P_{f3} \quad (3.57)$$

$$P_{3f} = U_{f1} \cdot I_{f1} \cdot \cos \varphi_{f1} + U_{f2} \cdot I_{f2} \cdot \cos \varphi_{f2} + U_{f3} \cdot I_{f3} \cdot \cos \varphi_{f3}$$

W przypadku symetrii napięć i prądów fazowych wyrażenie to upraszcza się do postaci:

$$P_{3f} = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi \quad (3.58)$$

**Przy połączeniu w gwiazdę**, jak na rys. 3.16, moc określimy zgodnie ze wzorem (3.57):

$$P_{3f} = 3 \cdot P_f = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi \quad (3.59)$$

Parametry elektryczne, którymi posługujemy się w praktyce zawodowej są parametrami zewnętrznymi maszyny. Najczęściej są nimi napięcie międzyprzewodowe  $U$  i prąd przewodowy /, przy czym:

$$I = I_f$$

$$U = \sqrt{3} \cdot U_f$$

zatem

$$P_{3f} = 3 \cdot \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (3.60)$$

**Przy połączeniu w trójkąt**, jak na rys. 3.17, moc określimy w sposób analogiczny jak przy połączeniu w gwiazdę:

$$P_{3f} = 3 \cdot P_f = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi$$

$$U = U_f$$

$$I = \sqrt{3} \cdot I_f$$

zatem

$$P_{3f} = 3 \cdot U \cdot \frac{I}{\sqrt{3}} \cdot \cos \varphi$$

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (3.61)$$

Z powyższego wynika, że wzór na trójfazową moc czynną prądu przemiennego nie zależy od układu połączeń (w trójkąt czy w gwiazdę).

Przez analogię do mocy czynnej, moc bierna w układach trójfazowych, dla napięć i prądów symetrycznych jest definiowana jako:

$$Q_{3f} = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_f \cdot \sin \varphi \quad (3.62)$$

Moc pozorna w układach trójfazowych, dla napięć i prądów symetrycznych jest określona wzorem:

$$S_{3f} = 3 \cdot U_f \cdot I_f = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_f \quad (3.63)$$

Z punktu widzenia zastosowań interesujące jest, w jaki sposób zmieniają się prądy i moce pobierane przez odbiornik trójfazowy zasilany napięciem międzyprzewodowym  $U$ , przy zmianie jego połączenia z gwiazdy na trójkąt. Przyjmując, że impedancja jednej fazy odbiornika wynosi  $Z_f$  otrzymamy:

a) przy połączeniu odbiornika w gwiazdę:

$$U_{fY} = \frac{U}{\sqrt{3}};$$

$$I_{fY} = \frac{U_f}{Z_f} = \frac{U}{\sqrt{3} Z_f} = I_Y \quad (3.64)$$

$$P_Y = 3U_{fY} \cdot I_{fY} \cdot \cos\varphi = 3 \frac{U}{\sqrt{3}} \frac{U}{\sqrt{3} Z_f} \cos\varphi = \frac{U^2}{Z_f} \cos\varphi$$

$$P_Y = \frac{U^2}{Z_f} \cos\varphi \quad (3.65)$$

b) przy połączeniu w trójkąt:

$$U_{f\Delta} = U$$

$$I_{f\Delta} = \frac{U_{f\Delta}}{Z_f} = \frac{U}{Z_f}$$

$$I_{\Delta} = \sqrt{3} I_{f\Delta} = \frac{\sqrt{3} U}{Z_f} \quad (3.66)$$

$$P_{\Delta} = 3U_{f\Delta} \cdot I_{f\Delta} \cdot \cos\varphi = 3U \frac{U}{Z_f} \cos\varphi = \frac{3U^2}{Z_f} \cos\varphi$$

$$P_{\Delta} = \frac{3U^2}{Z_f} \cos\varphi$$

Z porównania otrzymanych wielkości wynika, że:

$$\frac{I_Y}{I_{\Delta}} = \frac{1}{3}$$

$$\frac{P_Y}{P_{\Delta}} = \frac{1}{3}$$

Oznacza to, że przy przełączeniu odbiornika z trójkąta na gwiazdę trzykrotnie zmniejszają się jego moc i prąd pobierany z sieci. Zjawisko to jest wykorzystywane przy rozruchu silników asynchronicznych (tzw. rozruch gwiazda-trójkąt - patrz rozdz. 8.2.3) oraz przy dwustopniowej regulacji mocy grzejników trójfazowych.

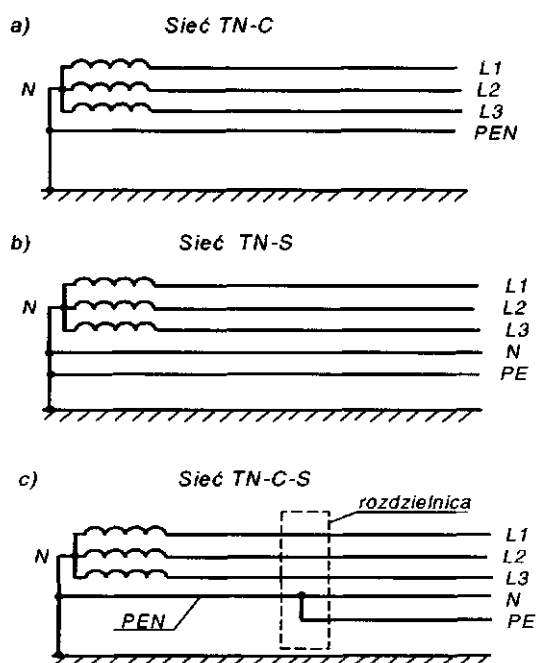
### 3.4.4. Układy sieci trójfazowych

Z punktu widzenia odbiorników rozróżnia się **sieci trój przewodowe z izolowanym od ziemi punktem zerowym** (bez względu na układ połączeń źródła napięcia) oznaczane symbolem IT, oraz **sieci czteroprzewodowe z uziemionym punktem zerowym** oznaczane symbolem TN.



W powszechnie dotąd używanej w Polsce sieci czteroprzewodowej typu TN-C (rys. 3.18 a) przewody fazowe sieci oznacza się odpowiednio **L1**, **L2** i **L3** a przewód połączony z punktem zerowym — **N**. W związku z wprowadzeniem sieci pięcioprzewodowej przewód zerowy w sieciach czteroprzewodowych oznaczany jest obecnie symbolem **PEN**. Ponieważ punkt zerowy w sieciach czteroprzewodowych jest uziemiony - przewód zerowy (neutralny) ma potencjał ziemi.

Istnieje jeszcze jeden rodzaj sieci czteroprzewodowej oznaczany jako **TT** (z identycznymi jak sieć TN oznaczeniami przewodów), różniący się od sieci TN stosowanymi w nim sposobami ochrony przed porażeniem elektrycznym, ale ze względu na wycofywanie go z eksploatacji jest on obecnie w naszym kraju praktycznie niespotykany.

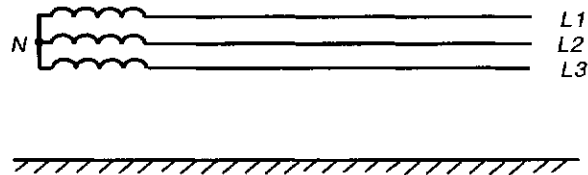


Rys. 3.18 Układy sieci trójfazowych typu TN z uziemionym punktem zerowym

W ostatnich latach zostały w Polsce wprowadzone ze względów na bezpieczeństwo przeciwporażeniowe **sieci pięcioprzewodowe typu TN-S** (rys. 3.18 b), w których piąty przewód (**przewód ochronny**) oznaczany jako **PE** jest również połączony z punktem zerowym i ma ten sam potencjał co przewód zerowy **N**. Sieci pięcioprzewodowe mają w przyszłości całkowicie zastąpić obecnie stosowane sieci czteroprzewodowe typu TN-C. W okresie przejściowym wolno sto-

sować sieć typu TN-C-S (rys. 3.18 c), która od transformatora do rozdzielnicy jest siecią czteroprzewodową, a od rozdzielnicy do odbiorników - pięcioprzewodową. Sieci cztero- i pięcioprzewodowe wykonuje się wyłącznie jako sieci niskiego napięcia (np. 380/220 V).

Sieci wysokiego napięcia oraz sieci okrętowe niskiego napięcia wykonuje się z reguły jako trójprzewodowe typu IT z izolowanym od ziemi punktem zerowym (rys. 3.19). Na statkach stosuje się sieci trójprzewodowe niskiego napięcia - 3 x 380 V, 50 Hz (lub - w standardzie anglosaskim - 3 x 440 V, 60 Hz) oraz 3 x 220 V.



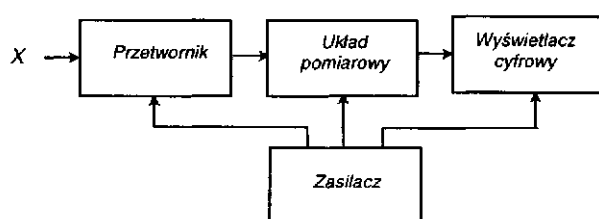
Rys. 3.19. Układy sieci trójfazowych typu IT z izolowanym punktem zerowym

## 4. Miernictwo i sygnalizacja

### 4.1. Budowa mierników elektrycznych

Elektryczne przyrządy pomiarowe ze względu na spełniane funkcje dzielą się na **mierniki, wskaźniki, rejestratory i liczniki**, a z punktu widzenia wielkości mierzonej na: **amperomierze, woltomierze, omomierze** itd. Mierniki elektryczne mogą być wykonane jako **jednozakresowe** - z jednym zakresem pomiarowym lub **wielozakresowe**.

Ze względu na konstrukcję przyrządy pomiarowe możemy podzielić na **cyfrowe** i **analogowe** (wskazówkowe). Ogólny schemat cyfrowego przyrządu pomiarowego przedstawia rys. 4.1.



Rys. 4.1. Schemat blokowy miernika cyfrowego

Wielkość mierzona  $X$  zostaje przetworzona w przetworniku np. na wartość średnią napięcia stałego. Wartość ta zostaje zmierzona przez elektroniczny układ pomiarowy, a wynik pomiaru przedstawiony na wyświetlaczu cyfrowym. Mierniki cyfrowe odznaczają się wieloma zaletami - szybkością pomiaru, dokładnością wskazań, wielofunkcyjnością i ogromnymi możliwościami rejestracji i obróbki wyników. Różnorodność mierników cyfrowych oraz ich układów znacznie wykracza poza tematykę niniejszego skryptu i dlatego zostaną one pominięte w dalszej części.

Mierniki wskazówkowe dzielą się ze względu na zasadę działania na: magnetoelektryczne, elektromagnetyczne, dynamiczne, indukcyjne, cieplne oraz rezonansowe (wibracyjne). Ogólną zasadę działania miernika wyjaśnia rys. 4.2.

Na oś miernika działa ustrój napędowy (o konstrukcji zależnej od rodzaju przyrządu) momentem napędowym  $M$ , zależnym od mierzonej wielkości  $X$ :

$$M = f(X) \quad (4.1)$$

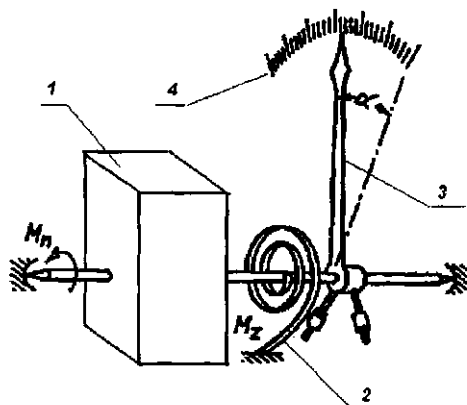
Pod wpływem momentu napędowego ustrój miernika wychyla się o pewien kąt  $\alpha$ , czemu przeciwstawiają się sprężyny zwrotne wytwarzające moment zwrotny  $M_z$ :

$$M_z = k \cdot \alpha \quad (4.2)$$

gdzie  $k$  - współczynnik proporcjonalności.

Równowaga ustala się przy zrównaniu momentów, tzn. przy  $M = M_z$ . Kąt, przy którym ta zależność jest spełniona, wynosi:

$$\alpha = \frac{1}{k} f(X) \quad (4.3)$$



Rys. 4.2. Zasada budowy miernika wskazówkowego:  
1 - organ napędowy ustroju pomiarowego, 2 - sprężyny zwrotne,  
3 - wskazówka, 4 - podziałka

W celu stłumienia drgań wskazówki, do osi przyrządu przymocowuje się tłumiki powietrzne lub magnetyczne. W miernikach precyzyjnych ustrój ruchomy zawieszają na sprężystych niciach, dających przy skręceniu moment zwrotny. Również wskazówkę mechaniczną w takich miernikach często zastępuje się wskazówką świetlną - promieniem z pomocniczego źródła światła odbijanym przez lustro, umocowane na ustroju ruchomym.

**Czułością miernika  $K$**  nazywamy liczbę działek podziałki przypadającą na jednostkę wielkości mierzonej:

$$K = \frac{\Delta \alpha}{\Delta X} \quad (4.4)$$

**Stałą miernika  $c$**  określa liczba jednostek wielkości mierzonej przypadająca na jednostkę kąta odchylenia (jest równa odwrotności czułości miernika):

$$c = \frac{\Delta X}{\Delta \alpha} = \frac{1}{K} \quad (4.5)$$

Liczba jednostek wielkości mierzonej przypadającej na jedną działkę podziałki określa **stałą podziałki  $c_p$** . Jest to iloraz pełnego zakresu miernika  $X_{max}$  do liczby działek podziałki  $n$ :

$$c_p = \frac{X_{max}}{n} \quad (4.6)$$

Niektóre mierniki wykonywane są jako **wieloustrojowe**. W takich miernikach kilka ustrojów pomiarowych działa na wspólnej osi, wytwarzając wypadkowy moment napędowy równy sumie momentów poszczególnych ustrojów. Mierniki wieloustrojowe służą do pomiaru sumy kilku wielkości jednego rodzaju, np. mocy lub energii układów trójfazowych.

## 4.2. Dokładność pomiaru miernikami elektrycznymi

### 4.2.1. Uchyby mierników

Wskazane przez miernik wartości wielkości mierzonej różnią się od wartości rzeczywistej (istotnej) tej wielkości. Powodem tego są uchyby wywołane właściwościami konstrukcyjnymi miernika (np. uchyb tarciový), uchyby przy jego skalowaniu oraz uchyby wynikające z warunków, w których pomiar został wykonany (np. inna temperatura otoczenia w czasie pomiaru niż w czasie skalowania).

Różnica między wartością  $W_w$  wskazaną przez miernik a wartością rzeczywistą  $W_{rz}$  wielkości mierzonej nazywa się **uchybem bezwzględnym**:

$$\Delta = W_w - W_{rz} \quad (4.7)$$

Uchyb bezwzględny może być dodatni lub ujemny w zależności od tego, czy wskazana przez miernik wartość jest większa, czy też mniejsza niż wartość rzeczywista.

Przy pomiarach wykonywanych za pomocą miernika wartość rzeczywistą wielkości mierzonej wyznacza się według wzoru:

$$W_{rz} = W_w - \Delta \quad (4.8)$$

utożsamiając w ten sposób uchyb bezwzględny miernika z uchybem bezwzględnym pomiaru.

Przedział wartości wielkości mierzonej odpowiadający całej podziałce miernika nazywa się **zakresem wskazań**. Tę część zakresu wskazań, dla której spełnione są wymagania dotyczące dokładności nazywa się **zakresem pomiarowym**.

Stosunek uchybu bezwzględnego  $\Delta$  miernika do wartości końcowej zakresu pomiarowego  $W_{\max}$  nazywa się **uchybem względnym miernika**:

$$\delta = \frac{\Delta}{W_{\max}} = \frac{W_w - W_{rz}}{W_{\max}} \quad (4.9)$$

**Uchyb względny** miernika można wyrazić również w procentach wartości końcowej zakresu pomiarowego:

$$\delta_{\%} = \frac{W_w - W_{rz}}{W_{\max}} 100\% \quad (4.10)$$

Uchyb względny pomiaru  $\delta_p$  wywołany uchybem miernika oblicza się według wzoru:

$$\delta_p = \frac{\Delta}{W_{rz}} = \delta \frac{W_{\max}}{W_{rz}} \quad (4.11)$$

Wzór (4.11) wskazuje na to, że im mniejsza jest wartość mierzona w porównaniu z wartością końcową zakresu pomiarowego, tym większy jest uchyb pomiaru. **Z tego też względu dobiera się miernik, jeżeli to tylko jest możliwe, w taki sposób, żeby korzystać z końcowej części podziałki.**

Największy dopuszczalny uchyb względny miernika  $\delta_{\max}$  (uchyb graniczny miernika), występujący w określonych przepisami normalnych warunkach pomiaru, podają wytwórcie. Znając ten uchyb można ustalić **największy dopuszczalny uchyb bezwzględny**  $\Delta^{TM*}$  dla każdej wartości wskazanej przez miernik w normalnych warunkach, a mianowicie:

$$\Delta_{\max} = S_{nm} W_{im} \quad (4.12)$$



## 4.2.2. Klasy dokładności mierników

Przepisy polskie zaliczają woltomierze, amperomierze i watomierze w zależności od ich uchybu granicznego do różnych klas dokładności. Przepisy te przewidują siedem klas dokładności, a mianowicie:

**0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 5**

Liczba oznaczająca klasę określa zarazem wartość uchybu granicznego w procentach  $d_{\%am&ex}$  dla mierników należących do danej klasy. Na przykład miernik klasy 1,5 nie powinien wykazywać większego uchybu względnego w warunkach normalnych niż 1,5% (w odniesieniu do wartości zakresu pomiarowego).

Na skalach mierników umieszczane są oznaczenia wskazujące, do jakiej klasy dokładności należy miernik. Jako oznaczenia służą liczby określające klasę, a więc na przykład na skalach mierników klasy 0,5 umieszcza się jako oznaczenie liczbę 0,5. Przyrządy klasy 0,1 stosuje się jako przyrządy wzorcowe, klasy 0,2 i 0,5 - w pomiarach laboratoryjnych, klasy 1 i 1,5 - w pomiarach przemysłowych, klasy 2,5 i 5 - w pomiarach orientacyjnych (przyrządy wskaźnikowe).

Mierniki klasy 2,5 i 1,5 sprawdza się za pomocą mierników klasy 0,5, mierniki zaś klasy 1 miernikami klasy 0,2. Mierniki klasy 0,5 i 0,2 sprawdza się za pomocą kompensatorów. Przepisy nie wymagają sprawdzania uchybu miernika na wszystkich kreskach działkowych podziałki, gdyż byłoby to zbyt pracochłonne. Wystarczy sprawdzenie na kreskach ocyfrowanych. Cyfry stawiane są zazwyczaj nad każdą dziesiątą kreską podziałki.

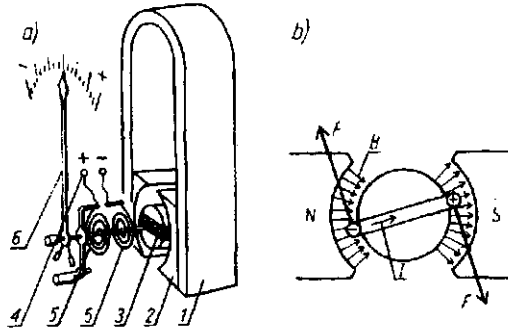
Należy podkreślić, że klasa miernika jest jego cechą charakterystyczną i nie określa błędu względnego każdego pomiaru. Aby wartości błędu pomiarowego nie przekraczały wartości granicznych określonych klasą, należy dobierać zakres pomiarowy tak, by jego górna granica była niewiele większa od wartości mierzonej. W praktyce uznaje się dokładność pomiaru za dostateczną, jeżeli wskazówka miernika wychyla się powyżej 2/3 zakresu pomiarowego.

## 4.3. Podstawowe rodzaje mierników elektrycznych

### 4.3.1. Mierniki magnetoelektryczne

Mierniki magnetoelektryczne zbudowane są z magnesu trwałego z nabe-gunnikami oraz cewki ruchomej nawiniętej na rdzeniu (rys. 4.3).





Rys. 4.3. Miernik magnetoelektryczny:

- a) budowa; b) zasada powstawania momentu napędowego;  
 1 - magnes trwały, 2 — nabiegownik, 3 - uzwojenie pomiarowe (cewka),  
 4 - zacisk przyłączeniowy przyrządu, 5 - sprężyna zwrotna, 6 - wskazówka

Stosując regułę lewej dłoni można wyznaczyć kierunek, w którym siły oddziałujące na boki cewki usiłują obrócić ją dookoła osi. Moment działający na cewkę wynosi:

$$M = c B I z \quad (4.13)$$

gdzie:

- $c$  - stała zależna od wymiarów cewki,
- $B$  - indukcja magnetyczna w szczelinie,
- $I$  - prąd w uzwojeniu cewki,
- $z$  - liczba zwojów cewki.

Ustrój ruchomy z cewką nie będzie obracał się dookoła osi jak silnik, gdyż na niego działa moment zwrotny  $M_z$  taśmy sprężystej zwiniętej w spiralę. Moment zwrotny jest proporcjonalny do wychylenia (4.2):

$$M_z = k \cdot \alpha$$

Wychylenie wskazówki ustabilizuje się, gdy  $M = M_z$ . Tak więc wychylenie miernika jest równe:

$$\alpha = \frac{c}{k} \cdot B \cdot z \cdot I = K \cdot I \quad (4.14)$$

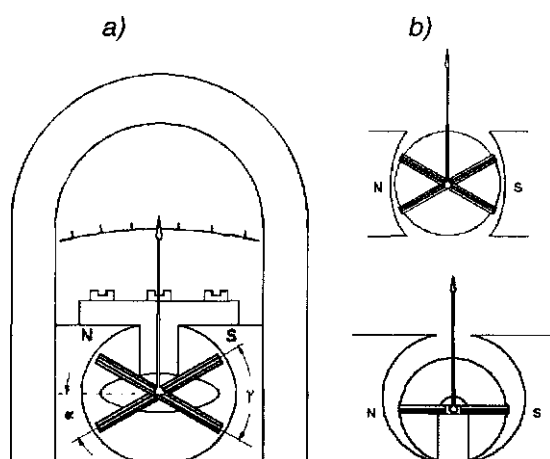
Ze wzoru (4.14) wynika, że wychylenie wskazówki jest wprost proporcjonalne do prądu (z uwzględnieniem znaku), stąd przy prądzie zmiennym mierniki te nie działają ze względu na bezwładność mechaniczną układu. Przyrządy magnetoelektryczne budowane są jako amperomierze lub woltomierze na prąd sta-

ły. Jeżeli miernik magnetoelektryczny zostanie włączony do obwodu pulsującego (zmieniającego okresowo wartość, lecz płynącego w tym samym kierunku), to jego wychylenie będzie proporcjonalne do wartości średniej przebiegu. Jeśli miernik ten zostanie włączony do obwodu prądu przemiennego przez prostownik, jego wychylenie jest proporcjonalne do wartości średniej prądu wyprostowanego. **Mierniki magnetoelektryczne prostownikowe** są używane jako mierniki uniwersalne do pomiaru prądu stałego i zmiennego.

### 4.3.2. Mierniki magnetoelektryczne ilorazowe

Miernik elektromagnetyczny ilorazowy (logometr magnetoelektryczny) jest odmianą ustroju magnetoelektrycznego. Logometr ma dwie skrzyżowane cewki ruchome połączone mechanicznie w sposób sztywny (rys.4.4 a). Boki cewek umieszczone są w szczelinach magnesu trwałego. Kształt szczelin jest taki, że skojarzone z cewkami pole magnetyczne jest nierównomierne (rys. 4.4 b). Kierunki przepływu prądów w cewkach są dobrane w taki sposób, żeby momenty napędowe cewek zwrócone były w przeciwne strony.

Prąd jest doprowadzany do cewek za pomocą miękkich taśm, wykonanych zwykle ze srebra lub ze złota. Moment zwracający taśm jest bardzo mały, tak że **położenie spoczynkowe organu ruchomego nie jest ustalone**. Jeżeli więc prąd nie płynie przez cewki ruchome, to wskazówka zatrzymuje się w dowolnym miejscu podziałki.



Rys. 4.4. Miernik magnetoelektryczny ilorazowy (logometr): a) budowa; b) rodzaje szczelin logometrów

Organ ruchomy logometru dąży do zajęcia położenia, w którym suma działających na niego momentów równa się zeru:  $EM = 0$ . Na organ ruchomy działają momenty napędowe obu cewek ( $M_1$  i  $M_2$ ) skierowane przeciwnie (moment zwracający taśm można pominąć), a więc:

$$M_1 = M_2 \quad (4.15)$$

Wzory na momenty napędowe cewki ustroju magnetoelektrycznego wyraża się wzorem:

Jeżeli boki cewki pierwszej znajdują się w polu magnetycznym o indukcji  $B_1$ , a boki cewki drugiej - w polu magnetycznym o indukcji  $B_2$ , wówczas moment cewki pierwszej:

$$M_1 = c_1 B_1 I_1 z_1 \quad (4.16) \text{ a moment cewki drugiej:}$$

$$M_2 = c_2 B_2 I_2 z_2 \quad (4.17)$$

Aby momenty napędowe cewek równały się sobie, boki cewki o mniejszej liczbie amperozwojów powinny się znaleźć w polu o indukcji większej niż boki cewki o większej liczbie amperozwojów.

Jeżeli nabiegunki i rdzeń magnesu ukształtowane są tak, że indukcja zmienia się wzdłuż szczeliny według zależności  $B = f(\alpha)$ , (gdzie  $\alpha$  oznacza kąt odchylenia organu ruchomego od pewnego położenia), to obowiązują następujące zależności:

$$M_1 = c_1 f(\alpha) I_1 z_1$$

$$M_2 = c_2 \cdot f(\alpha + \gamma) I_2 z_2$$

przy czym  $\gamma$  - kąt między cewkami.

W przypadku równowagi momentów  $M_1 = M_2$ .

skąd:

$$c_1 \cdot f(\alpha) I_1 z_1 = c_2 f(\alpha + \gamma) I_2 z_2$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{c_2 \cdot f(\alpha + \gamma) z_2}{c_1 \cdot f(\alpha) z_1} = k \cdot F(\alpha)$$

Przyjmując:

$$k = \frac{c_2 z_2}{c_1 z_1} = const$$

Otrzymujemy:

$$\alpha = k_1 \cdot \varphi \left( \frac{I_1}{I_2} \right) \quad (4.18)$$

Tak więc kąt odchylenia organu ruchomego, a więc i wskazanie, *zależy* nie od wartości bezwzględnych prądów w cewkach, lecz od ilorazu tych prądów, stąd też nazwa ustroju. Mierniki magnetoelektryczne ilorazowe stosowane są do pomiaru wielkości fizycznych tam, gdzie *zależy* nam na pomiarze ilorazu dwu wielkości. Szerzej zastosowanie mierników ilorazowych omówiono w pkt. 4.4 i 4.5.

### 4.3.3. Mierniki elektromagnetyczne

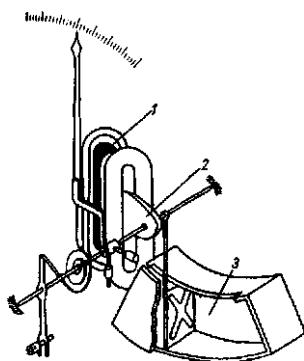
Mierniki elektromagnetyczne zbudowane są z nieruchomej cewki, przez którą płynie mierzony prąd elektryczny. Prąd ten wytwarza strumień magnetyczny, który działając na ruchomy rdzeń ferromagnetyczny wciąga go do środka cewki. Zasadę działania miernika elektromagnetycznego pokazuje rys.4.5.

Prąd przepływający przez cewkę miernika o indukcyjności  $L$  wytwarza pole magnetyczne. Energia zmagazynowana w tym polu, przy przepływie prądu o wartości skutecznej  $I$ , wynosi:

$$W = \frac{1}{2} L I^2 \quad (4.19)$$

Przy zmianach położenia rdzenia o kąt  $d\alpha$ , energia ta ulega zmianie o  $dW$ . Powstaje wtedy moment napędowy:

$$M = \frac{dW}{d\alpha} = \frac{I^2}{2} \frac{dL}{d\alpha} \quad (4.20)$$



Rys. 4.5. Miernik elektromagnetyczny: 1 - cewka; 2 - płaski rdzeń ruchomy; 3 - tłumik

Moment zwrotny powstający przy skręceniu sprężynek jest proporcjonalny do odchylenia (4.2). Kąt ce, przy którym ustali się równowaga (a więc wychylenie miernika), wynosi:

$$\alpha = c I^2 \frac{dL}{d\alpha} \quad (4.21)$$

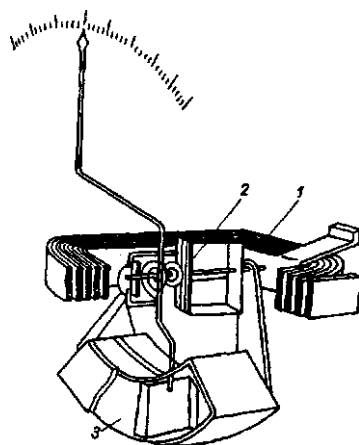
Jak wynika ze wzoru (4.21), przy  $dL/d\alpha = \text{const}$ , odchylenie jest proporcjonalne do kwadratu prądu. Wskazania miernika nie zależą więc od kierunku prądu (gdyż kwadrat jest zawsze wartością dodatnią).

**Mierniki elektromagnetyczne wskazują wartość skuteczną mierzonej wielkości**, stąd nadają się do pomiaru zarówno prądu stałego jak i przemiennego, ale stosowane są przede wszystkim jako amperomierze i woltomierze prądu przemiennego.

#### 4.3.4. Mierniki elektrodynamiczne

Organ pomiarowy mierników elektrodynamicznych składa się z dwu uzwojeń - ruchomego i nieruchomego. Zasada budowy mierników elektrodynamicznych pokazana jest na rys. 4.6.

Przez cewki pomiarowe płyną prądy o wartościach skutecznych  $I_1$  i  $I_2$ . Moment obrotowy będzie zależał od amperozwojów w cewce nieruchomej i w cewce ruchomej. Moment napędowy jest więc proporcjonalny do prądów w obu cewkach. Moment ten równoważony jest momentem zwracającym przy skręcaniu sprężyn. Równowaga tych momentów wyznacza położenie cewki ruchomej.



Rys. 4.6. Miernik elektrodynamiczny: 1 - uzwojenie nieruchome; 2 - uzwojenie ruchome; 3 - tłumik

Wychylenie miernika można wyrazić wzorem:

$$\alpha = c I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_{12} \quad (4.22)$$

gdzie:

$\cos \varphi_{12}$  - cos kąta zawartego między wskazami  $I_1$  i  $I_2$ ,

$c$  - stała zależna od budowy przyrządu.

Przyrządy elektrodynamiczne stosowane są jako precyzyjne amperomierze i woltomierze prądu stałego i zmiennego. Jeżeli cewki połączy się szeregowo, to moment napędowy jest wówczas proporcjonalny do kwadratu prądu.

Znacznie szersze zastosowanie znalazły przyrządy elektrodynamiczne jako przyrządy do pomiaru mocy czynnej i biernej - watomierze i waromierze. Schemat połączenia miernika elektrodynamicznego jako watomierza przedstawia rys. 4.7.

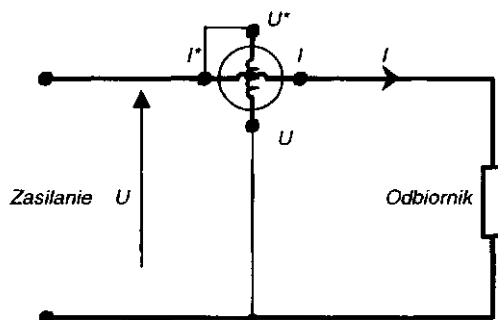
Cewkę nieruchomą (o zaciskach oznaczonych  $I^*$  -  $I$ ) łączy się szeregowo z odbiornikiem, przy czym płynie przez nią prąd  $I$  równy prądowi pobieranemu przez odbiornik. Cewkę ruchomą (o zaciskach  $U^*$  -  $U$ ) włącza się równoległe do odbiornika, płynie przez nią prąd  $I_2$ . Wartość prądu  $I_2$  zależy od napięcia  $U$  w obwodzie oraz rezystancji cewki ruchomej  $R_{wU}$ :

$$I_2 = \frac{U}{R_{wU}}$$

Kąt przesunięcia fazowego między prądami w obu cewkach jest równy kątowi przesunięcia fazowego odbiornika  $\varphi_{12} = \varphi$ . Odchylenie wskazówki wynosi zgodnie ze wzorem (4.22):

$$\alpha = c \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = c \cdot P \quad (4.23)$$

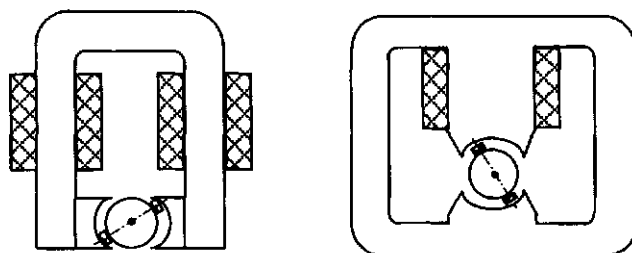
a zatem jest proporcjonalne do mocy czynnej w obwodzie.



Rys. 4.7. Schemat połączeń watomierza

### 4.3.5. Mierniki ferrodynamiczne

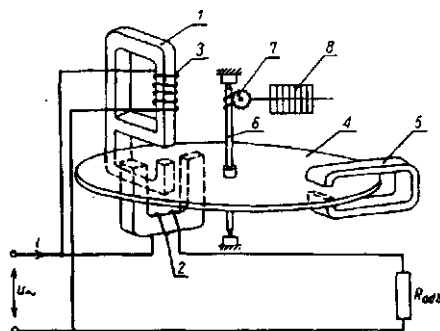
Mierniki ferrodynamiczne są odmianą przyrządów elektrodynamicznych. Zastosowanie tych mierników jest analogiczne jak mierników elektrodynamicznych. Różnica konstrukcji polega na wprowadzeniu stali do obwodu magnetycznego ustroju, co umożliwi zwiększenie strumienia magnetycznego cewki nieruchomej bez zwiększania mocy pobranej. Na rysunku 4.8 przedstawiono dwa typy konstrukcji tych ustrojów.



Rys. 4.8. Obwody magnetyczne mierników ferromagnetycznych

### 4.3.6. Mierniki indukcyjne

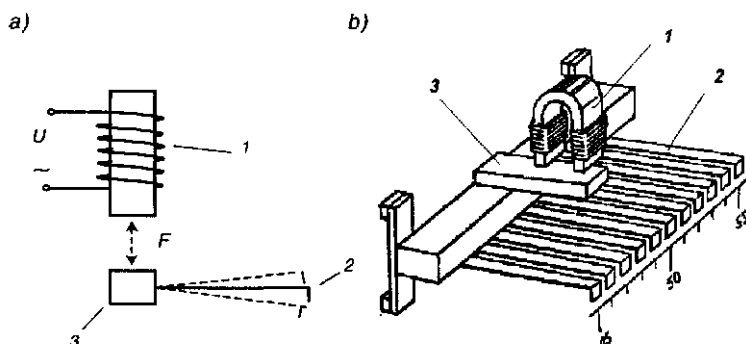
Działanie przyrządów pomiarowych indukcyjnych polega na wytwarzaniu prądów wirowych w tarczy aluminiowej, które powodują powstanie momentu obrotowego tarczy. W miernikach indukcyjnych moment zwrotny wytwarza sprężyna spiralna. Mierniki indukcyjne są raczej mało rozpowszechnione, natomiast ustrój pomiarowy indukcyjny jest powszechnie stosowany w licznikach energii elektrycznej.



Rys. 4.9. Licznik energii elektrycznej:

1 - rdzeń, 2 - cewka prądowa, 3 - cewka napięciowa, 4 - tarcza, 5 - magnes trwały, 6 - oś tarczy, 7 - przekładnia ślimakowa, 8 - liczydło

Zasada budowy licznika jest przedstawiona na rys. 4.9. Moment napędowy powstaje wskutek oddziaływania pola magnetycznego wytwarzanego przez dwa uzwojenia na prądy wirowe, wytwarzane przez to pole w obracającej się tarczy aluminiowej. Moment hamujący wytwarza magnes stały.



Rys. 4.10. Częstościomierz rezonansowy:  
a) zasada działania; b) uproszczony widok;  
1 - elektromagnes, 2 - blaszki, 3 - zwora














#### 4.3.7. Mierniki rezonansowe

Mierniki rezonansowe (nazywane też wibracyjnymi) w praktyce występują tylko jako przyrządy do pomiaru częstotliwości. Budowę częstościomierza wyjaśnia rys. 4.10. W polu elektromagnesu, zasilanego napięciem o mierzonej częstotliwości / znajduje się stalowa listwa z blaszkami (Języčkami") o różnej długości. Blaszki te mają różne częstotliwości drgań własnych. Blaszka o częstotliwości drgań własnych równej  $2/$  wpada w rezonans i wykazuje dużą amplitudę wahań, tworząc obraz prostokąta na skali. Wówczas ze skali miernika można odczytać wartość mierzonej częstotliwości. Na statkach stosuje się częstościomierze z dwoma, bliźniaczymi ustrojami pomiarowymi. Pozwala to na porównywanie częstotliwości w dwu obwodach.

#### 4.3.8. Oznaczenia na skalach mierników elektrycznych

Najważniejsze cechy miernika elektrycznego są przedstawione w postaci symboli na jego skali. Poniżej umieszczono niektóre z nich.

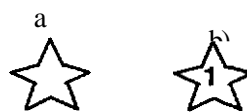


Miernik prądu stałego Miernik	—
prądu przemiennego Miernik	~
uniwersalny	~
Miernik prądu trójfazowego	~ ~ ~
a) z jednym, b) z dwoma, c) z trzema ustrojami pomiarowymi	~ ~ ~
Miernik magnetoelektryczny	
a) o ruchomej cewce	
b) o ruchomym magnesie stałym	
c) ilorazowy (logometr)	
d) prostownikowy	
Miernik elektromagnetyczny	
Miernik elektrodynamiczny	
Miernik ferromagnetyczny	
Miernik indukcyjny	
Miernik rezonansowy	
Ustawienie miernika w czasie pracy a) poziome, b) pionowe, c) pochyłe	  

Klasy dokładności  
a) 0,5 %, b) 1 %, c) 2,5 %

a) 0,5      b) 1,0      c) 2,5

Napięcie probiercze  
a) 500 V, b) 1 kV



Zacisk uziemiający



Dotknięcie przyrządu może



Dotknięcie przyrządu (kolor  
strzałki - czerwony)

## 4.4. Pomiary wielkości elektrycznych

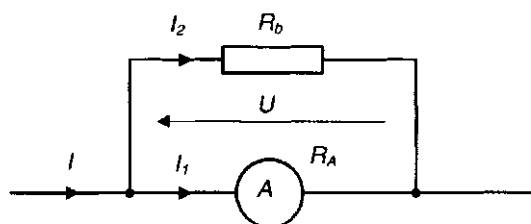
### 4.4.1. Pomiary prądu i napięcia

Ustrój pomiarowy (cewka ruchoma) wraz z doprowadzającymi połączeniami jest wykonany z bardzo cienkich drucików. Przez taki ustrój może płynąć nieduży prąd elektryczny, zazwyczaj 10 ( $I_A$  do 30 mA. Pamiętając o tym, że odchylenie ustroju ruchomego jest wprost proporcjonalne do prądu:

$$\alpha = c \cdot I$$

a wartości prądu w praktyce znacznie przekraczają dopuszczalne prądy płynące przez ustrój, dlatego też istnieje potrzeba poszerzenia zakresu pomiarowego przyrządów.

Do amperometry i woltometry magnetoelektrycznych dobiera się odpowiednie rezystory, wykonane z manganinu, który ma mały współczynnik temperaturowy rezystancji. W amperomierzach rezystor ten dołącza się równolegle do zacisków miernika i jest on nazywany bocznikiem (rys. 4.11). Boczniki mogą być wbudowane do amperomierza lub dołączone do niego z zewnątrz.



Rys. 4.11. Sposób włączenia bocznika do amperomierza magnetoelektrycznego

Przez miernik płynie tylko część prądu, zaś reszta przepływa przez bocznik. Oznaczając przez  $R_A$  rezystancję wewnętrzną amperomierza, zaś przez  $R_b$  - rezystancję bocznika, na podstawie praw Kirchhoffa można napisać:

$$U = I_1 \cdot R_A = I_2 \cdot R_b$$

Prąd całkowity wynosi:

$$I = I_1 + I_2 = I_1 + I_1 \frac{R_A}{R_b} = I_1 \left( 1 + \frac{R_A}{R_b} \right)$$

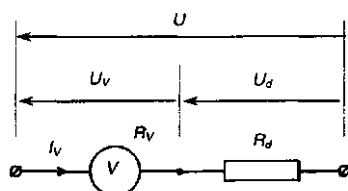
Jeśli przez  $n$  oznaczy się mnożnik zakresu, to:

$$n = \frac{I}{I_1} = 1 + \frac{R_A}{R_b}$$

Tak więc rezystancja bocznika rozszerzającego zakres amperomierza winna wynosić:

$$R_b = \frac{R_A}{n - 1} \quad (4.24)$$

Rezystor dołączany do woltomierza dla rozszerzenia jego zakresu nosi nazwę posobnika i jest połączony szeregowo z cewką miernika (rys. 4.12).



Rys. 4.12. Sposób włączenia posobnika do woltomierza magnetoelektrycznego

Pod wpływem przyłożonego napięcia  $U$  przez woltomierz popłynie prąd  $I_v$ :

$$I_v = \frac{U}{R_v + R_d}$$

gdzie:

$R_v$  - rezystancja wewnętrzna woltomierza,  
 $R_d$  - rezystancja posobnika.

Jeśli przez  $n$  oznaczy się mnożnik zakresu, to jest on równy:

$$n = \frac{U}{U_V} = \frac{I_V(R_V + R_d)}{I_V \cdot R_V} = 1 + \frac{R_d}{R_V}$$

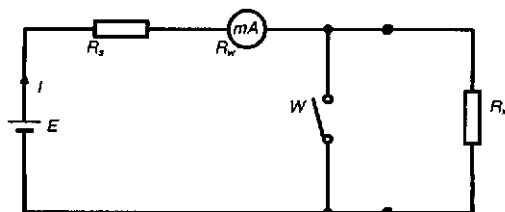
zatem rezystancja posobnika rozszerzającego zakres woltomierza winna wynosić:

$$R_d = (n - 1) R_V \quad (4.25)$$

W jednozakresowych miernikach prądu przemiennego stosuje się rozszerzanie zakresu pomiarowego za pomocą transformatorów pomiarowych - **przekładników**. Przekładnik transformuje prąd lub napięcie w obwodzie mierzonym do zakresu miernika, jednocześnie oddzielając galwanicznie miernik od tego obwodu. Budowę i zasadę działania transformatorów pomiarowych omówiono szerzej w rozdz. 9.3. W amperomierzach wielozakresowych kilka zakresów prądowych można uzyskać poprzez dzielenie uzwojeń miernika i łączenie je w różnych kombinacjach, natomiast w woltomierzach stosuje się posobniki, podobnie jak w miernikach magnetoelektrycznych.

#### 4.4.2. Pomiary rezystancji

Pomiary rezystancji dla celów technicznych można wykonywać za pomocą omomierzy - magnetoelektrycznych mierników natężenia prądu, wyskalowanych w jednostkach rezystancji. Rozróżnia się omomierze z cewką pojedynczą w szeregowym lub równoległym układzie pomiarowym oraz z cewką podwójną - omomierze logometryczne.



Rys. 4.13. Układ omomierza szeregowego

W omomierzu szeregowym, przedstawionym na rysunku 4.13 (przy założeniu, że układ jest zasilany z idealnego źródła siły elektromotorycznej  $E$ ), po załączeniu przycisku  $P$  przez miernik popłynie prąd maksymalny o wartości:

$$I_{\max} = \frac{E}{R} = c \cdot \alpha_{\max} \quad (4.26)$$

gdzie:  $R = R_s + R_w$ ,

- $R_s$  - rezystancja dodatkowa,
- $R_w$  - rezystancja wewnętrzna miernika,
- $\alpha_{\max}$  - maksymalne wychylenie wskazówki miernika,
- $c$  ~ współczynnik proporcjonalności.

Po podłączeniu mierzonej rezystancji  $R_x$  i rozłączeniu łącznika  $P$  popłynie prąd:

$$I_x = \frac{E}{R + R_x} = c \cdot \alpha_x$$

$$\frac{I_x}{I_{\max}} = \frac{R}{R + R_x} = \frac{\alpha_x}{\alpha_{\max}} \quad \text{Dzieląc powyższe}$$

a po przekształceniu:

$$\alpha_x = \frac{1}{1 + \frac{R_x}{R}} \alpha_{\max} \quad \text{wyrażenia stronami}$$

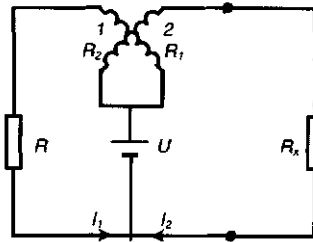
otrzymamy:

(4-27)

Zmiany napięcia baterii zasilającej omomierz oraz rezystancja przewodów pomiarowych mają decydujący wpływ na wskazania przyrządu. Wpływ ten eliminuje się przed pomiarem, zmieniając za pomocą rezystorów regulacyjnych lub boczników magnetycznych wskazania przyrządu tak, by przy zwartych przewodach pomiarowych odchylenie wskazówki odpowiadało wartości zerowej podziałki. W omomierzach szeregowych wielozakresowych zakres mierzonych rezystancji zawiera się w granicach od 10 Q do 100 MD. W miernikach uniwersalnych (multimetrach) analogowych i cyfrowych pomiar rezystancji realizuje się zazwyczaj na zasadzie omomierza szeregowego.

Omomierze zbudowane na bazie logometru magnetoelektrycznego (zasada działania logometru magnetoelektrycznego została omówiona w pkt. 4.2) wykorzystuje się do pomiaru rezystancji bardzo dużych (megaomomierze) oraz do mierzenia wielkości nieelektrycznych, np. temperatury (wykorzystując zależność rezystancji czujki pomiarowej od temperatury). Układ logometru zapewnia prawidłowy pomiar przy wahaniach napięcia zasilającego (rys. 4.14).





Rys. 4.14. Schemat omomierza logometrycznego

Jeżeli napięcie zasilania miernika wynosi  $U$ , to prądy  $I_1$  i  $I_2$  płynące w cewkach przyrządu wynoszą:

$$I_1 = \frac{U}{R_1 + R}$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2 + R_x}$$

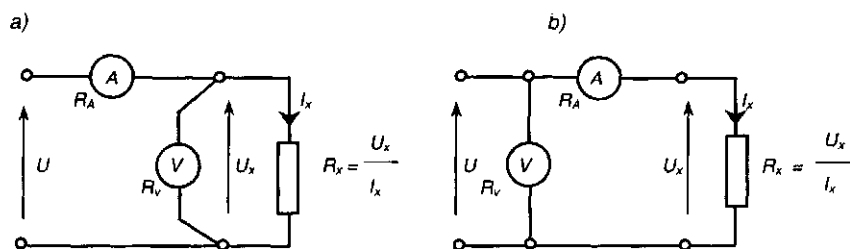
a wychylenie organu ruchomego jest zależne od ilorazu prądu w obu cewkach, a także od rezystancji mierzonej  $R_x$ , gdyż:

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{R_2 + R_x}{R_1 + R}\right) \quad (4.28)$$

Omomierze ilorazowe stosowane do pomiaru dużych rezystancji (np. rezystancji izolacji) zwane są megaomomierzami. Najbardziej rozpowszechnione są megaomomierze induktorowe, w których źródłem napięcia jest mała prądnica prądu stałego z napędem ręcznym. Napięcie zasilania (a tym samym i pomiaru) wytwarzane przez prądnice megaomomierzy wynosi od 50 do 5000 V (najczęściej stosuje się napięcia 250 V, 500 V lub 1000 V). Napięcie wytwarzane przez prądnicę jest zależne wprawdzie od prędkości obrotowej napędu ręcznego, ale w układzie logometru nie wpływa to znacząco na poprawność pomiaru.

Oprócz megaomomierzy induktorowych stosowane są też megaomomierze elektroniczne, w których źródłem napięcia pomiarowego jest przetwornica tranzystorowa z regulowaną skokowo wartością napięcia pomiarowego, zasilana z ogniwa galwanicznego lub akumulatora.

Pomiary rezystancji mogą być wykonywane **metodą techniczną** (za pomocą woltomierza i amperomierza), w której rezystancję oblicza się z pomiaru prądu i napięcia. Na rysunku 4.15 przedstawiono dwie odmiany metody technicznej.



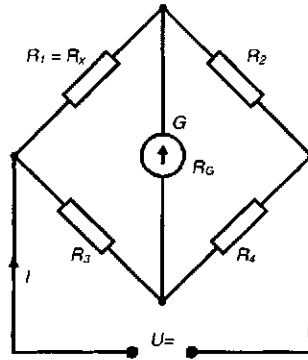
Rys. 4.15. Układy do pomiaru rezystancji metoda techniczną:  
a) pomiar małych rezystancji; b) pomiar dużych rezystancji

W układzie przedstawionym na rys. 4.15 a woltomierz mierzy napięcie  $U_x$ , natomiast amperomierz - sumę prądów płynących przez rezystancję  $R_x$  oraz woltomierz. Wyznaczając w tym układzie rezystancję na podstawie pomiarów prądu i napięcia popełnia się błąd, bowiem wartość obliczona jest mniejsza od wartości rzeczywistej. Błąd jest tym mniejszy, im mniejsza jest wartość mierzonej rezystancji w stosunku do rezystancji wewnętrznej woltomierza  $R_v$ . Dlatego układ nadaje się do pomiaru małych rezystancji (praktycznie przyjmuje się, że  $R_x < 10Q$ ). W układzie przedstawionym na rys. 4.15 b poprawnie mierzony jest prąd, a woltomierz mierzy spadek napięcia na rezystancji  $R_x$  i rezystancji wewnętrznej amperomierza  $R_A$ . Błąd metody powoduje, że wartość obliczona rezystancji (na podstawie pomiarów) jest większa od wartości rzeczywistej. Błąd jest tym mniejszy, im większa jest rezystancja mierzona od rezystancji wewnętrznej amperomierza  $R_A$ . Dlatego układ nadaje się do pomiaru dużych wartości rezystancji (przyjmuje się praktycznie, że  $R_x > 10H$ ).

Do dokładnych pomiarów rezystancji stosuje się metody mostkowe. **Mostek Wheatstone'a** jest przeznaczony do dokładnych pomiarów średnich i dużych rezystancji. Uproszczony schemat mostka Wheatstone'a przedstawiony jest na rysunku 4.16. Ma on cztery gałęzie, w które włączone są trzy rezystory regulacyjne  $R_2$ ,  $R_3$  i  $R_4$  oraz rezystor  $R_x$  (lub  $R_v$ ), którego wartość chcemy zmierzyć. W jedną przekątną mostka włączony jest miernik natężenia prądu z zerem pośrodku skali, zaś w drugą - źródło prądu stałego.

W mostkach laboratoryjnych, umożliwiających pomiar rezystancji z dokładnością do 0,01%, miernikiem natężenia prądu jest galwanometr, a rezystory  $R_2$ ,  $R_3$  i  $R_4$  są dokładnymi rezystorami dekadowymi. W mostkach przenośnych (technicznych), mierzących z dokładnością do 1%, w miejsce galwanometru stosuje się mikroamperomierz, rezystory  $R_3$  i  $R_4$  są rezystorami suwakowymi (wykonanymi najczęściej w kształcie pierścienia), zaś rezystor  $R_2$  jest regulowany skokowo w zależności od zakresu pomiarowego.





Rys. 4.16. Mostek Wheatstone'a

Zakres pomiarowy mostka uzależniony jest od rodzaju i jakości zastosowanych elementów. Dolna granica zakresu pomiarowego ograniczona jest wpływem rezystancji przewodów pomiarowych, zaś górna - czułością galwanometru oraz rezystancją rezystorów regulacyjnych. Na podstawie praw Kirchhoffa można wyznaczyć prąd  $I_g$  płynący przez galwanometr:

$$I_g = U \frac{R_1 \cdot R_4 - R_2 \cdot R_3}{R_1 \cdot R_2 \cdot (R_3 + R_4) + (R_1 + R_2) \cdot [R_3 \cdot R_4 + R_g \cdot (R_3 + R_4)]}$$

W stanie równowagi mostka prąd  $I_g$  równy jest 0, co uzyskuje się przez odpowiedni dobór wartości rezystancji  $R_2$ ,  $R_3$ , i  $R^*$ . W powszechnie stosowanych mostkach, zwanych mostkami zrównoważonymi, pomiar przeprowadza się w stanie równowagi mostka. Prąd  $I_g$  jest równy 0 wtedy, gdy spełnione jest:

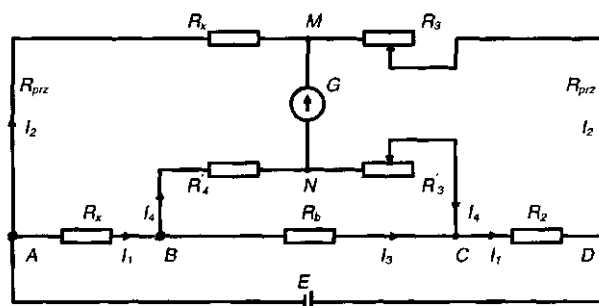
$$R_1 \cdot R_4 - R_2 \cdot R_3 = 0$$

Stąd możemy obliczyć rezystancję mierzoną  $R_x =$

$$R_x = R_1 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_4} \quad (4.29)$$

Rezystancję mierzoną  $R_x$  można określić również ze wskazań galwanometru, gdyż przy stałych rezystancjach regulacyjnych prąd galwanometru jest funkcją rezystancji mierzonej. Taki pomiar stosuje się w innej odmianie mostka zwanej mostkiem niezrównoważonym. W mostku niezrównoważonym, używanym zwykle do pomiaru małych odchyleń rezystancji w stosunku do wartości znamionowej, galwanometr wyskalowany jest bezpośrednio w omach lub w procentach odchylenia rezystancji mierzonej od rezystancji znamionowej.

Błędy występujące przy pomiarach laboratoryjnych mostkiem Wheatstone'a mogą być spowodowane niedostateczną czułością galwanometru, rezystancją przewodów pomiarowych (lub rezystancjami na styku przewodów — zacisk mostka) oraz siłami termoelektrycznymi występującymi w obwodach mostka.



Rys. 4.17. Mostek Thomsona

**Mostek Thomsona** stosowany jest do pomiaru małych rezystancji od  $10^{-6}\Omega$  do  $1\Omega$ . Za pomocą odpowiedniego układu połączeń można znacznie zmniejszyć wpływ rezystancji przewodów łączeniowych i rezystancji styków, który występuje w mostku Wheatstone'a. Uproszczony schemat mostka Thomsona jest przedstawiony na rysunku 4.17.

Błąd powstający wskutek rezystancji połączeń i styków można ograniczyć w następujący sposób:

- pomiar wykonuje się za pomocą dwóch par przewodów pomiarowych, stąd rezystory  $R_x$  oraz  $R_2$  powinny mieć po dwie pary zacisków: prądowe i napięciowe,;
- przewód łączący  $R_b$  bocznikuje się rezystorami  $R_3$  i  $R_4$ , dobranymi zgodnie z warunkiem równowagi mostka:

$$\frac{R_4'}{R_3} = \frac{R_4}{R_3} = \frac{R_x}{R_2}$$

- rezystory w układzie mostka powinny mieć rezystancję większą od  $10\Omega$ . (praktycznie stosuje się rezystancje o wielkości kilku tysięcy  $\Omega$ ),

Pomiar polega na doprowadzeniu mostka do stanu równowagi. W tym stanie przez galwanometr nie płynie prąd, gdyż potencjały punktów  $M$  i  $N$  są jednakowe.

Dla obwodu określonego punktami  $A B N M A$  równanie spadków napięć wynosi:

$$(R_4 + R_{prz}) \cdot I_2 = (R_4' + R_{prz}) \cdot I_4 + R_x \cdot I_1$$

natomiast dla obwodu określonym punktami  $C N M D C$  będzie:

$$(R_3 + R_{prz}) \cdot I_2 = (R_3' + R_{prz}) \cdot I_4 + R_2 \cdot I_1$$

Jeśli powyższe równania podzielimy stronami oraz przyjmiemy, że w praktycznych rozwiązaniach  $R_3 = R_3'$  i  $R_4 = R_4'$  otrzymamy wyrażenie na rezystancję mierzoną  $R_x$ :

$$R_x = R_2 \frac{R_4 + R_{prz}}{R_3 + R_{prz}}$$

Ponieważ wartości rezystancji  $R_3$  i  $R_4$  są znacznie większe od rezystancji przewodów łączeniowych  $R_{prz}$ , te ostatnie można pominąć i przyjąć wyrażenie na wartość  $R_x$  w postaci:

$$R_x = R_2 \frac{R_4}{R_3}$$

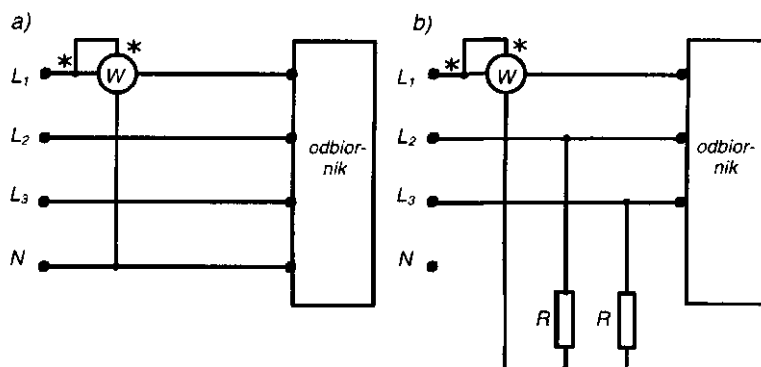
W laboratoryjnych mostkach Thomsona stan równowagi otrzymuje się przez regulację stosunku rezystancji  $R_4 = R_4'$  do  $R_3 = R_3'$ , przy stałej rezystancji jednostopniowego rezystora wzorcowego  $R_2$ . Zazwyczaj na obudowach tych mostków umieszczone są zaciski, do których przyłącza się rezystor mierzony  $R_x$ , rezystor wzorcowy  $R_2$ , galwanometr oraz źródło napięcia zasilającego. W mostkach typu technicznego wszystkie elementy mostka znajdują się wewnątrz obudowy.

#### 4.4.3. Pomiary mocy układów trójfazowych

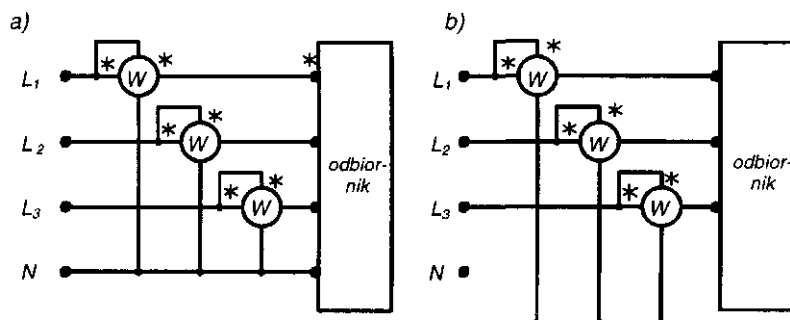
Zastosowanie metody pomiaru mocy czynnej prądu trójfazowego uwarunkowane jest rodzajem sieci zasilającej (trójprzewodowa lub czteroprzewodowa), symetrią lub asymetrią impedancji fazowych odbiornika oraz (w przypadku sieci czteroprzewodowej) dostępnością punktu zerowego odbiornika.

W sieciach czteroprzewodowych pomiar mocy czynnej dla odbiorników symetrycznych można zrealizować stosując metodę jednego watomierza (rys. 4.18 a). W przypadku odbiornika z dostępnym punktem zerowym, cewkę prądową watomierza włącza się szeregowo do jednego z przewodów fazowych, cewkę napięciową między zaciski tego przewodu a punkt zerowy odbiornika. Jeśli punkt zerowy odbiornika jest niedostępny (np. występuje to w odbiornikach połączonych w trójkąt), tworzy się sztuczny punkt zerowy (rys. 4.18 b) za pomocą rezystorów dobranych według warunku  $R = R_w$  (gdzie  $R_w$  jest rezystancją cewki napięciowej watomierza). W metodzie jednego watomierza całkowitą

moc czynną pobieraną przez układ oblicza się mnożąc przez 3 wskazania watomierza.



Rys. 4.18. Pomiar mocy w sieciach trójfazowych czteroprzewodowych symetrycznych z dostępnym (a) i niedostępnym (b) punktem zerowym



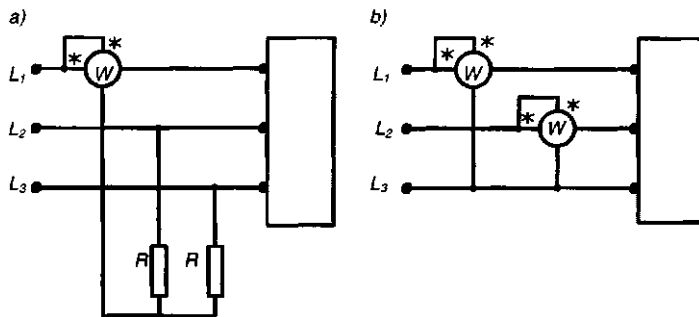
Rys. 4.19. Pomiar mocy w sieciach trójfazowych czteroprzewodowych niesymetrycznych z dostępnym (a) i niedostępnym (b) punktem zerowym

Metodę trzech watomierzy (rys.4.19 a) należy stosować w przypadku asymetrii odbiornika lub asymetrii napięć zasilających. Dla odbiorników z niedostępnym punktem zerowym (rys. 4.19 b) tworzy się sztuczny punkt zerowy, podobnie jak w metodzie jednego watomierza. Całkowita moc czynna pobierana przez układ jest równa sumie wskazań watomierzy.

W pomiarach technicznych oraz jako mierniki tablicowe, stosuje się zamiast trzech osobnych watomierzy - watomierze trójfazowe trój systemowe.

W sieciach trój przewodowych z symetrycznymi odbiornikami można stosować metodę jednego watomierza, tworząc dla niego sztuczny punkt zerowy

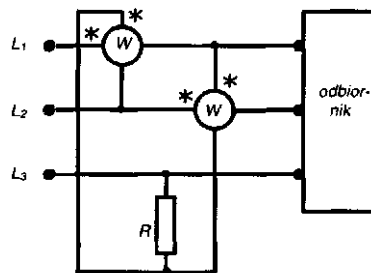
(rys. 4.20 a). Najczęściej stosuje się jednak, niezależnie od symetrii sieci i odbiorników, metodę dwu watomierzy, zwaną też układem Arona (rys. 4.20 b). Uzwojenia prądowe watomierzy należy włączać szeregowo do dwu dowolnych przewodów fazowych, natomiast uzwojenia napięciowe między zaciski tych przewodów a przewód trzeci.



Rys. 4.20. Pomiar mocy w układach trójfazowych trój przewodowych symetrycznych (a) i niesymetrycznych (b)

Moc całkowita układu jest równa sumie wskazań watomierzy. Watomierze dwusystemowe pracujące w układzie Arona działają na takich samych zasadach, jak układy składające się z dwóch osobnych watomierzy.

**Pomiary mocy biernej** w układach trójfazowych realizuje się watomierzami łączonymi w podobne układy, jak w przypadku pomiarów mocy czynnej. W układach okrętowych stosuje się też metodę pomiaru mocy biernej **watomierzami** połączonymi w układ przedstawiony na rys. 4.21.



Rys. 4.21. Pomiar mocy biernej za pomocą dwóch watomierzy

W układzie przedstawionym na rysunku 4.21 moc bierna  $Q$  układu jest równa:

$$Q = \sqrt{3} (P_{w1} + P_{w2}) \quad (4.31)$$

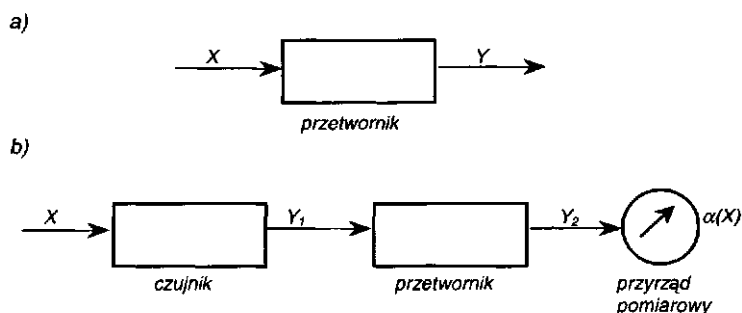
gdzie:

$P_{w1}$  i  $P_{w2}$  – wskazania watomierzy.

W praktyce okrętowej stosuje się pomiar mocy czynnej i biernej tym samym watomierzem dwu systemowym z podwójną podziałką- dla mocy czynnej i biernej. Uzwojenia napięciowe obu systemów watomierza są przełączane specjalnym łącznikiem dla dokonywania pomiarów odpowiedniej mocy.

## 4.5. Pomiar wielkości nieelektrycznych

W praktyce często zachodzi konieczność pomiaru metodami elektrycznymi takich wielkości nieelektrycznych jak temperatura, prędkość obrotowa, wilgotność, napięcia, drgania itp. W tym celu wielkość mierzoną  $X$  należy przetworzyć na wielkość elektryczną  $F$ , którą nazywamy **elektrycznym sygnałem pomiarowym**. Zadanie to **spełniają przetworniki pomiarowe** (rys.4.22).



Rys. 4.22. Pomiar wielkości nieelektrycznej: a) pomiar bezpośredni; b) pomiar pośredni

Przetwornikiem pomiarowym nazywamy urządzenie elektryczne, które przetwarza z określoną dokładnością jedną wielkość na inną wg żądanej zależności. Jeżeli w układzie pomiarowym zachodzi potrzeba kilkakrotnego przetwarzania sygnału pomiarowego nazywamy to przetwarzaniem wielostopniowym. Stosując oddzielne przetworniki, pierwszy z nich nazywamy **przetwornikiem pierwotnym lub czujnikiem**, a następne **przetwornikami wtórnymi lub przetwornikami**.

Czujniki mogą być **generacyjne**, tzn. takie, w których wielkością wyjściową jest prąd lub napięcie, albo **parametryczne** - w których wielkością wyjściową jest zmiana parametrów elektrycznych takich jak: rezystancja, pojemność, indukcyjność, przenikalność magnetyczna  $\mu$  lub przenikalność dielektryczna  $\epsilon$ .

#### 4.5.1. Pomiary temperatury

Powszechnie stosowane metody pomiaru temperatury są oparte na wykorzystaniu **czujników termoelektrycznych** (parametrycznych), w których zmiana temperatury  $T$  powoduje zmianę rezystancji  $R$ .

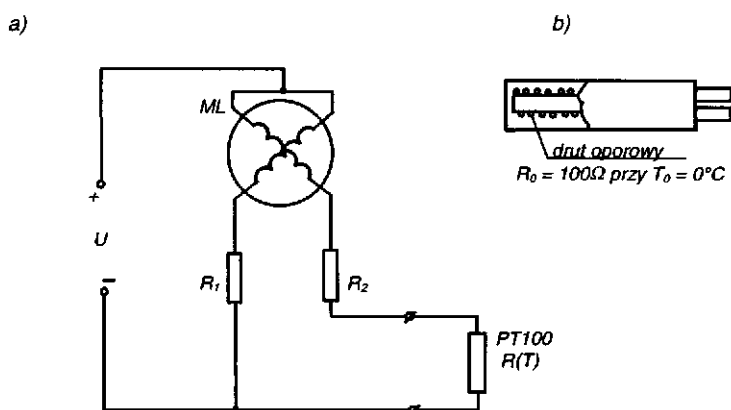
W praktyce okrętowej popularnym czujnikiem stosowanym do pomiaru temperatury w zakresie 0 - 160°C jest **termometr platynowy pałeczkowy typu PT 100**, którego funkcja przetwarzania sygnału wyraża się zależnością:

$$R(T) = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (4.32)$$

gdzie:

- $R_0$  – rezystancja początkowa (odniesienia),
- $T_0$  – temperatura początkowa (odniesienia),
- $\alpha$  – temperaturowy współczynnik rezystancji.

Ze względu na wydzielanie się ciepła w rezystancji przy przepływie prądu pomiarowego, jego wartość musi być mała i wynosi 3<sup>-15</sup> mA. Pomiaru dokonujemy najczęściej w układzie przedstawionym na rys. 4.23.



Rys. 4.23. Układ pomiarowy temperatury za pomocą czujnika typu PT 100: a) schemat układu; b) budowa czujnika temperatury

Wychylenie miernika logometrycznego będzie wynosić:

$$(4-33) \quad \alpha = f_1 \left( \frac{I_1}{I_2} \right) = f_2 [R(T)]$$

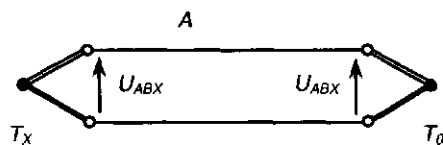
a więc wychylenie

wskazówki będzie zależało od

temperatury mierzonej  $T$ .

Stosuje się również pomiary temperatury, w których jako przetworniki wykorzystuje się termistory - elementy rezystancji silnie zależnej od temperatury. Innym sposobem pomiaru temperatury jest wykorzystanie **czujników termoelektrycznych generacyjnych** tzw. termooogniwi lub termoelementów.

Działanie termooogniwi opiera się na zjawisku termoelektrycznym Seebecka, polegającym na powstawaniu siły elektromotorycznej na styku różnych metali (najczęściej NiCr-Ni) zależnej od temperatury otoczenia. Zakres pomiarowy termometrów z ogniwami termoelektrycznymi zazwyczaj wynosi 100 -s- 500°C. Rysunek 4.24 ukazuje zasadę działania termooogniwa.



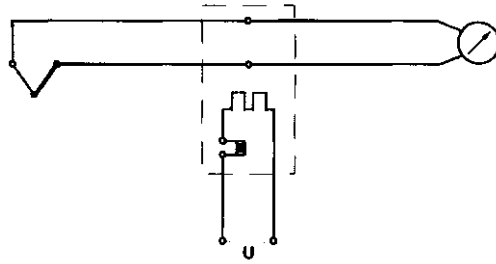
Rys. 4.24. Zasada działania termooogniwa

Jeżeli temperatura  $T_x = T_0$ , to  $U_{ABX} = -U_{ABO}$  i napięcia znoszą się w obwodzie zamkniętym. Jeżeli  $T_x \neq T_0$ , pojawia się różnica napięć  $U(T)$  zwana napięciem termoelektrycznym:

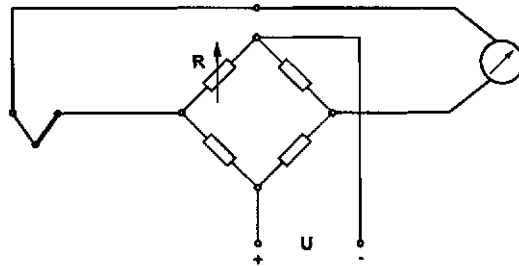
$$U(T) = \alpha(T_x - T_0) \quad (4.34)$$

Istotną sprawą jest, żeby pomiar odbywał się w stosunku do określonej stałej temperatury odniesienia  $T_0$  w punkcie porównawczym. Wykonuje się to zwykle przez umieszczenie punktu porównawczego w skrzynce nagrzewanej grzejnikiem elektrycznym (rys. 4.25) ze stabilizacją temperatury. Nagrzewana skrzynka może zawierać punkty porównawcze większej liczby obwodów pomiarowych. Można też stosować w punkcie porównawczym mostek kompensacyjny (znoszący wpływ wzrostu temperatury punktu porównawczego), jak pokazano na rys. 4.26.





Rys. 4.25. Pomiar temperatury z podgrzewanym punktem pomiarowym



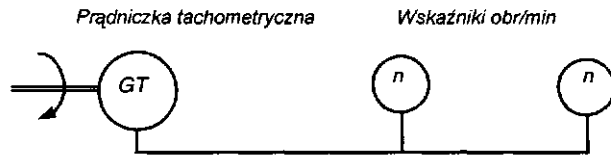
Rys. 4.26. Pomiar temperatury z mostkiem kompensacyjnym

#### 4.5.2. Pomiary prędkości obrotowej

Najczęściej spotykanym urządzeniem pomiarowym prędkości obrotowej silników spalinowych i wału śrubowego na statkach są **prądniczki tachometryczne** (rys. 4.27). Budowa prądniczek tachometrycznych, najczęściej z magnesami trwałymi, tzn. o stałym strumieniu magnetycznym (przy  $\langle P = \text{const.} \rangle$ ), sprawia, że generowana siła elektromotoryczna  $E$  jest proporcjonalna do prędkości obrotowej  $n$ :

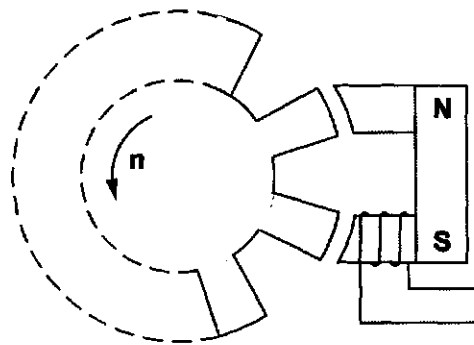
$$E = c \cdot \Phi \cdot n = k \cdot n \quad (4.35)$$

Do pomiaru generowanego napięcia służy woltomierz magnetoelektryczny wyskalowany w 1/min (obrotach na minutę). Jedna prądniczka tachometryczna może zasilać kilka wskaźników. Prądniczka tachometryczna spełniająca rolę czujnika generacyjnego, może być prądnicą prądu stałego lub prądu przemiennego. W tym drugim przypadku wskaźnikiem jest również miernik magnetoelektryczny, lecz zasilany przez układ prostowników.



Rys. 4.27. Pomiar prędkości obrotowej z zastosowaniem prądniczki tachometrycznej

**Elektromagnetyczne przetworniki prędkości obrotowej** są wykorzystywane do pomiaru zarówno prędkości maszyn, jak i do mierników przepływu (np. zużycia paliwa).



Rys. 4.28. Zasada działania przetwornika elektromagnetycznego prędkości obrotowej

Zasada działania takich urządzeń jest następująca (rys. 4.28). Obracające się koło zębate z materiału ferromagnetycznego powoduje zmianę reluktancji obwodu magnetycznego. To z kolei powoduje zmianę strumienia magnetycznego, który zgodnie z prawem indukcji wytworzy w cewce zmienną siłę elektromotoryczną o częstotliwości:

$$f = \frac{m \cdot n}{60} \quad (4.36)$$

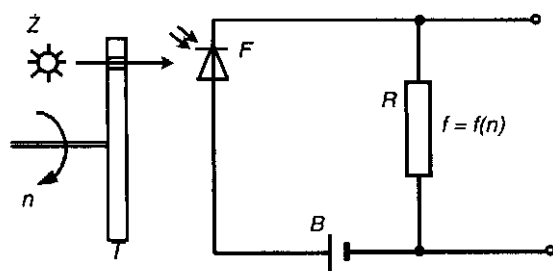
gdzie:

- $m$     liczba zębów na kole, liczba obrotów na minutę,
- $n$     częstotliwość [Hz].

Częstotliwość mierzy się najczęściej miernikiem cyfrowym, który może być wyskalowany w obr/min lub  $\text{cm}^3/\text{s}$  (w przepływomierzach).

Oprócz wspomnianych metod pomiaru prędkości obrotowej, mogą być stosowane (raczej do pomiarów okresowych) metody: fotoelektryczna i stroboskopowa.

**Metoda fotoelektryczna** oparta jest na zjawisku zmiany przewodzenia **fotodiody** w zależności od strumienia świetlnego padającego na nią. Strumień świetlny wysyłany z żarówki  $Z$  dociera do fotodiody  $F$  w momentach, gdy pozwala na to otwór lub szczelina międzyzębna w obracającej się tarczy (rys. 4.29). Prąd płynący z baterii  $B$  przez fotodiody  $F$  i rezystor  $R$  powoduje powstanie zmiennego napięcia na rezystorze o częstotliwości  $f$ . Sygnał ten jest przetwarzany na wartość prędkości [l/min] najczęściej w mierniku cyfrowym.



Rys. 4.29. Fotodiodowy przetwornik prędkości obrotowej

**Metoda stroboskopowa** jest stosowana do dorywczych pomiarów, a w eksploatacji urządzeń okrętowych mało spotykana.

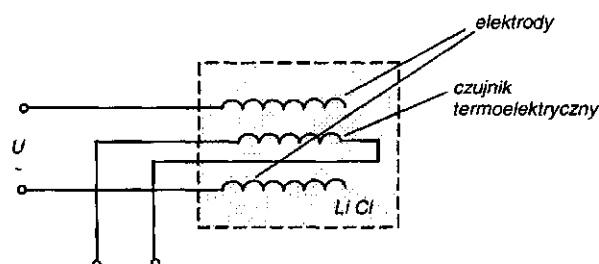
### 4.5.3. Pomiar wilgotności powietrza

Określenie wilgotności względnej powietrza można dokonać przez pomiar **temperatury powietrza i temperatury punktu rosy**, po czym z wykresu oznacza się wilgotność względną.

Pomiar temperatury punktu rosy polega na pomiarze temperatury podgrzewanego **roztworu nasyconego soli chlorku litu (LiCl)** między elektrodami, do których zostaje przyłożone napięcie przemienne (rys. 30).

Prąd płynący przez roztwór LiCl ogrzewa go, wskutek czego następuje odparowanie wody z roztworu, przez co zmniejsza się jego przewodność (konduktywność). Powoduje to zmniejszenie prądu i w konsekwencji spadek temperatury roztworu. Ponieważ sól LiCl jest silnie higroskopijna, więc chłonie wilgoć z otaczającego powietrza, przez co znów prąd rośnie i temperatura wzrasta itd. Po pewnym czasie temperatura i prąd ustabilizują się i nastąpi stan równo-

wagi. Temperatura tego stanu odpowiada temperaturze punktu rosy powietrza otaczającego czujnik. Ponieważ temperatura ta zależy tylko od ciśnienia cząstkowego pary otaczającego powietrza, jest więc miarą wilgotności bezwzględnej.



Rys. 4.30. Schemat czujnika wilgotności

## 4.6. Sygnalizacja

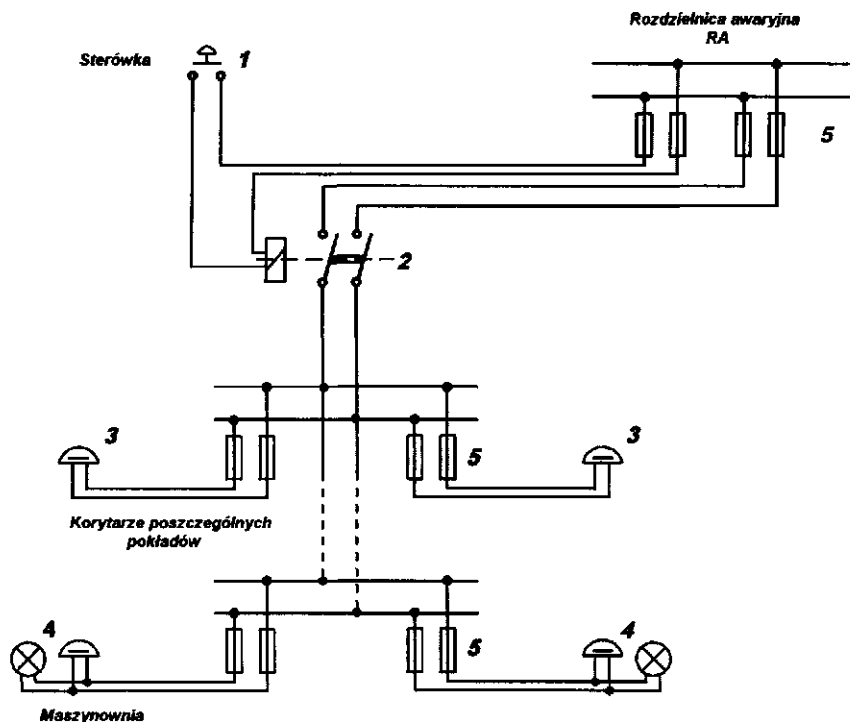
Na statkach stosowana jest duża różnorodność sygnalizacji zarówno stanów alarmowych, jak i stanu pracy poszczególnych ważnych urządzeń lub systemów. Temat ten w niniejszym opracowaniu potraktowany jest z konieczności tylko marginalnie. Do ważniejszych zaliczamy:

- a) sygnalizację alarmową ogólnookrętową,
- b) sygnalizację pożarową,
- c) sygnalizację COi,
- d) sygnalizację stanów krytycznych (temperatury i ciśnienia) silnika głównego,
- e) sygnalizację niskiego stanu rezystancji izolacji,
- f) sygnalizację „człowiek w chłodni”,
- g) sygnalizację zamknięcia drzwi wodoszczelnych.

### 4.6.1. Sygnalizacja alarmowa ogólnookrętową

Sygnalizacja alarmowa ogólnookrętową ma za zadanie informowanie osób znajdujących się na statku o określonej sytuacji awaryjnej, np. alarm pożarowy, alarm wodny, człowiek za burtą, alarm manewrowy itp.

Urządzeniami wykonawczymi sygnału są dzwonki, buczki i sygnały świetlne w miejscach o dużym natężeniu hałasu. Zasilanie jest realizowane z rozdzielnicy awaryjnej. Stanowisko sterujące znajduje się na mostku. Schemat elektryczny instalacji alarmowej pokazano na rys. 4.31.



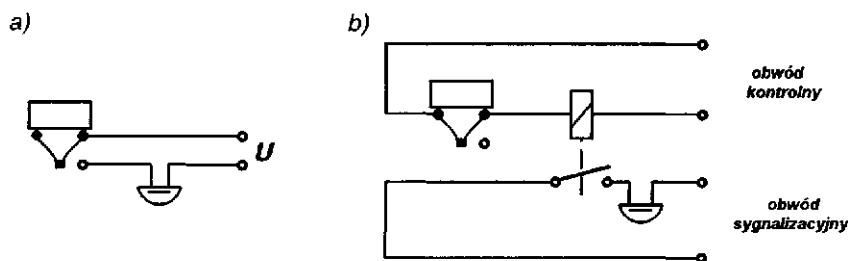
Rys. 4.31. Schemat elektryczny sygnalizacji alarmowej ogólnookrętowej: 1 - przycisk sterujący w sterówce, 2 - stycznik pośredniczący, 3 — dzwonki sygnalizacyjne, 4 - dzwonki z lampką sygnalizacyjną, 5 - zabezpieczenie zwarciowe

#### 4.6.2. Sygnalizacja pożarowa

Sygnalizacja zagrożenia pożarowego może być wykonana jako:

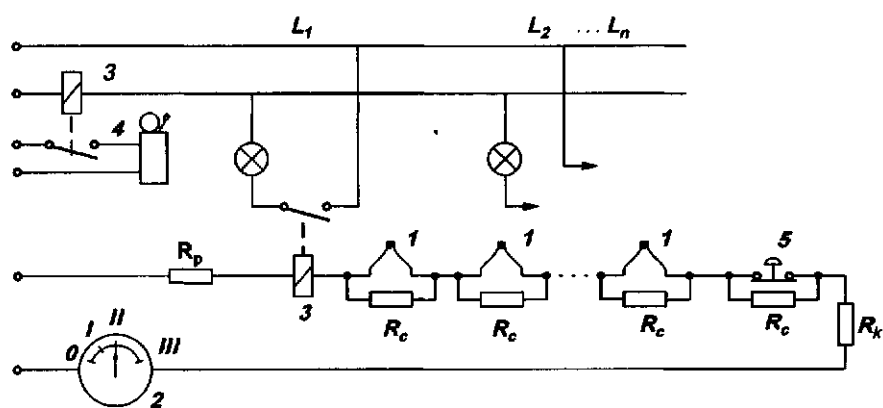
- a) temperaturowa,
- b) dymowa-jonizacyjna.

Powszechnie stosowana sygnalizacja pożarowa, temperaturowa oparta jest na czujnikach wykonanych z dwóch sprężystych pasków metalowych, połączonych ze sobą lutem w temperaturze topnienia  $70^{\circ}\text{C}$ . Przy wzroście temperatury otaczającego powietrza powyżej  $70^{\circ}\text{C}$ , spoiwo topi się, a odskakujące sprężyste paski przełączają swoje styki. Układ sygnalizacyjny może więc być wykonany przy wykorzystaniu styków rozwieranych lub zwiernych, jak pokazano na rys. 4.32.



Rys. 4.32. Zasada działania sygnalizacji pożarowej:  
a) układ normalnie bezprądowy; b) układ normalnie z przepływem prądu w obwodzie kontrolnym

Czujniki te są łączone szeregowo po kilka lub kilkanaście w jednym obwodzie kontrolującym określony rejon pożarowy. Przykładowy schemat pracy układu pokazano na rys. 4.33.



Rys. 4.33. Schemat układu z czujnikami temperaturowymi:  
1 - czujnik temperaturowy, 2 - miliamperomierz (I, II, III - wskazania miernika odpowiadające prądom  $I$ ,  $I_n$  i  $I_m$ ), 3 - przekaźniki prądowe, 4 - sygnalizacja akustyczna, 5 - przycisk kontrolny,  $R_p, R_k, R_c$  - rezystory

W stanie normalnym, bezawaryjnym w obwodzie dozoru popłynie prąd  $I$  ograniczony rezystancją  $R_n = R_p + R_k$ . W stanie awaryjnym, pożarowym w obwodzie popłynie prąd  $I'$  ograniczony rezystancjami  $= R_p + R_k + R_c$ .

Stan zwarcia w linii kablowej spowoduje zwiększenie prądu do wartości  $I_m$ , gdyż  $R_m = R_p$ . Przerwa w obwodzie, tzn.  $R = \infty$  spowoduje, że  $I = 0$ . W ten sposób wartość prądu w obwodzie sygnalizuje określony stan urządzenia lub sytuacji pożarowej danego rejonu.

Czujniki pożarowe są wykonywane również ze stykami bimetalowymi. W tym przypadku są one wielokrotnego użytku, gdyż po ostygnięciu (jeżeli nie są przegrzane) wracają do stanu pierwotnego.

**Jonizacyjny czujnik dymu** jest urządzeniem sygnalizującym i alarmującym o pojawieniu się dymu w pomieszczeniu chronionym. Umożliwia on wczesne stwierdzenie powstawania pożaru, na długo przed pojawieniem się ognia lub niebezpiecznym wzrostem temperatury.

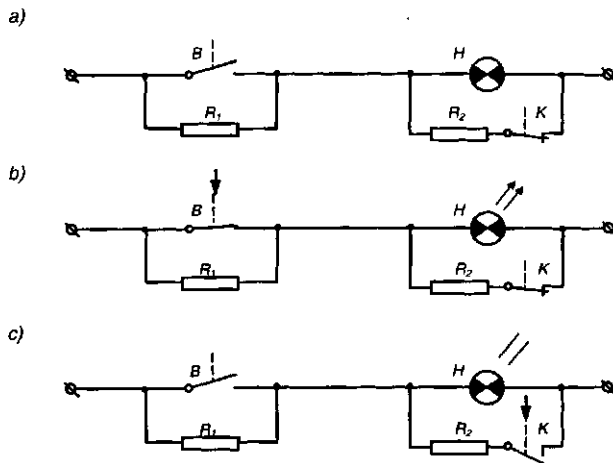
Czujnik zwany również **detektorem** zbudowany jest z dwóch komór jonizacyjnych. Jedna z nich jest komorą zamkniętą, natomiast druga otwarta, do której z łatwością przedostaje się powietrze z otoczenia. Wewnątrz tych komór znajduje się materiał radioaktywny, jonizujący powietrze w obu komorach. Przedostanie się dymu do otwartej komory utrudnia w niej jonizację, co zmienia równowagę elektryczną układu. Dalsze przetworzenie sygnału następuje w elektronicznej centralce.

Współczesne układy elektroniczne centralek umożliwiają określenie pomieszczenia (a nie tylko rejonu), w którym wystąpiło zagrożenie. Są to tzw. **analogowo-adresowalne** centrale sterujące.

### 4.6.3. Sygnalizacja drzwi wodoszczelnych

Na statku znajduje się kilka do kilkunastu przedziałów wodoszczelnych, oddzielonych od siebie drzwiami wodoszczelnymi. Stan zamknięcia tych drzwi musi być znany służbom dowodzącym statkiem w celu szybkiego reagowania w razie np. przedostania się wody do wnętrza statku. Schemat sygnalizacji zamknięcia drzwi wodoszczelnych przedstawia rys. 4.34.

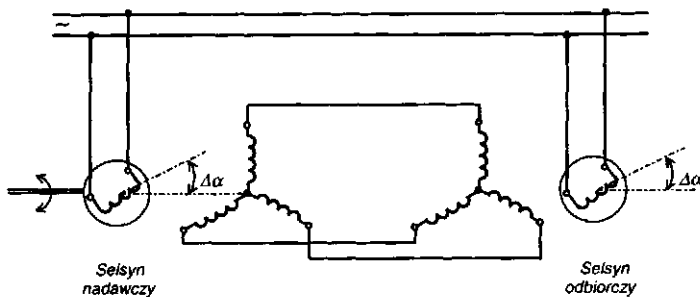
Przy każdych drzwiach wodoszczelnych jest zainstalowany wyłącznik krańcowy  $B$ , włączający obwód zasilania lampki kontrolnej  $H$  na tablicy kontroli stanu położenia drzwi. Zamknięcie drzwi powoduje zaświecenie się lampki kontrolnej danych drzwi. Jeżeli drzwi nie zostaną zamknięte całkowicie, wtedy prąd w obwodzie płynie przez opornik  $R_1$ , bocznikujący łącznik krańcowy  $B$  oraz przez (połączone równolegle) lampkę kontrolną  $H$  i rezystor  $R_2$ . Prąd płynący wówczas przez lampkę jest zbyt mały do jej rozjarzenia. Lampka może również nie świecić wskutek przepalenia się lub uszkodzenia instalacji. Do skontrolowania układu służy przycisk kontrolny  $K$ , przerywający obwód rezystora  $R_2$  bocznikującego lampkę. Naciśnięcie tego przycisku, przy niedomkniętych drzwiach, spowoduje przepływ prądu tylko przez rezystor  $R_1$  i lampka zaświeci. Natomiast naciśnięcie przycisku kontrolnego przy zamkniętych drzwiach spowoduje zaświecenie lampki światłem silniejszym od normalnego.



Rys. 4.34. Sygnalizacja drzwi wodoszczelnych:  
 a) drzwi otwarte; b) drzwi zamknięte; c) kontrola obwodu przy drzwiach  
 niedomkniętych;  $B$  - łącznik krańcowy,  $H$  - lampka sygnalizacyjna,  
 $R_1/R_2$  - rezystory bocznikujące,  $K$  - przycisk kontrolny

#### 4.6.4. Sygnalizacyjne łącza selsynowe

Do sygnalizacji położenia steru służy **wskaznik położenia steru**, wykonany najczęściej jako łącze selsynowe. Selsyn jest niewirującą mikromaszyną elektryczną, służącą do przekazywania sygnału proporcjonalnego do kąta skręcenia. Zasadę działania łącza selsynowego przedstawia rys. 4.35.



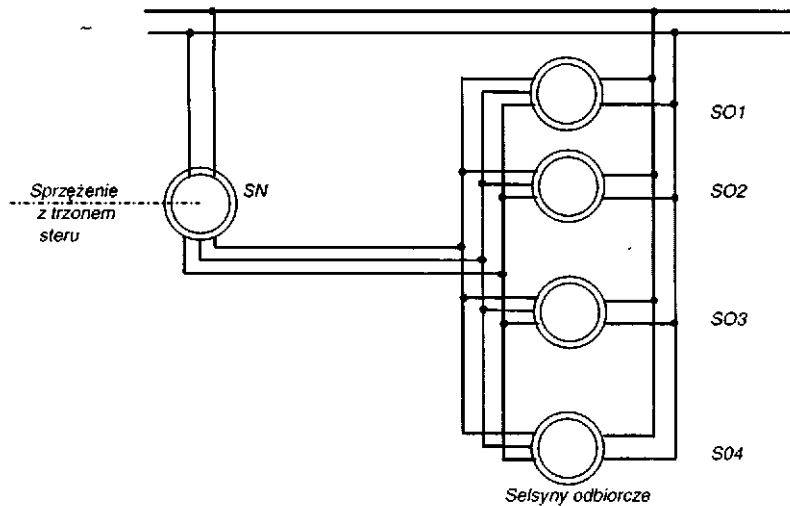
Rys. 4.35. Zasada działania łącza selsynowego

Łącze selsynowe składa się co najmniej z dwóch selsynów - nadawczego i odbiorczego, połączonych linią łączności. Selsyn posiada dwa uzwojenia - jednofazowe (zasilane napięciem zmiennym) i trójfazowe (połączone z analo-



gicznym uzwojeniem drugiego selsynu). Skręcenie osi selsynu nadawczego powoduje powstanie momentu skręcającego w wirniku selsynu odbiorczego i jego obrót do położenia zgodnego z wirnikiem selsynu nadawczego.

We wskaźnikach położenia steru selsyn nadawczy (rys. 4.36) jest sprzężony poprzez przekładnię łańcuchową z trzonem steru. Selsyny odbiorcze są połączone równoległe i umieszczone w różnych miejscach.

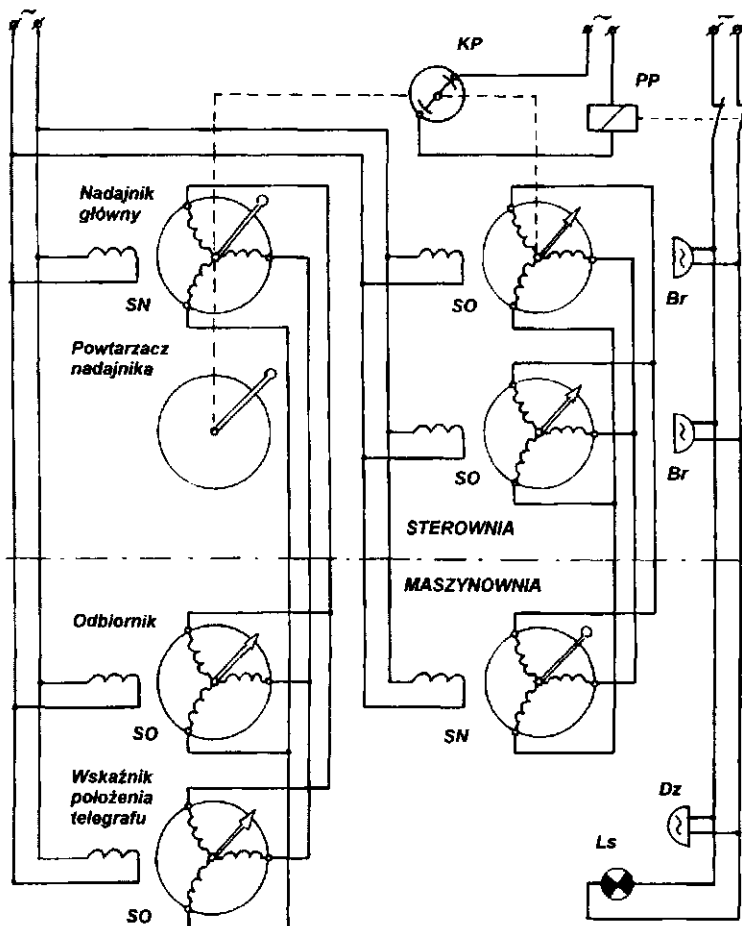


Rys. 4.36. Schemat wskaźnika położenia steru

Łącza selsynowe wykorzystywane są również w niektórych rodzajach telegrafów maszynowych. **Telegraf maszynowy** służy do porozumiewania się między sterownią a stanowiskiem manewrowym silnika głównego i może przekazywać określoną ilość poleceń dotyczących prędkości obrotowej silnika i kierunku ruchu. W skład telegrafu wchodzi dwa łącza selsynowe. Pierwsze służy do przekazywania poleceń z mostka do maszynowni, a drugie - przekazuje z maszynowni na mostek potwierdzenie, że polecenie zostało przyjęte i zrozumiane. W celu nadania polecenia dźwignią nadajnika przekręca się wirnik selsynu nadawczego, umieszczając sprzężoną z nim wskazówkę na polu odpowiadającym wydanemu rozkazowi. W selsynie odbiorczym wirnik przekręca się synchronicznie z nadajnikiem, wskazując odpowiednie pole na tarczy. Skwitowanie rozkazu w maszynowni odbywa się w podobny sposób, gdyż przekręcając dźwignię w położenie zgodne z otrzymanym poleceniem, powoduje się przekręcenie wirnika w selsynie odbiorczym nadajnika.

Kontrola poprawności skwitowania rozkazu jest realizowana przez kontroler **KP**, który uruchamia przez przekaźnik pomocniczy **PP** zestaw brzęczyków i dzwonek działających dotąd, dopóki nie nastąpi zgodność położenia wskazówki selsynu odbiorczego nadajnika i jego dźwigni.

Rysunek 4.37 przedstawia uproszczony schemat telegrafu maszynowego prądu przemiennego polskiej produkcji.



Rys. 4.37. Schemat telegrafu maszynowego:  
 SN - selsyn nadawczy, SO - selsyn odbiorczy, Br - brzęczyk, Dz - dzwonek,  
 LS - lampka sygnalizacyjna, PP - przekaźnik pomocniczy, KP - kontroler  
 zgodności położenia selsynów

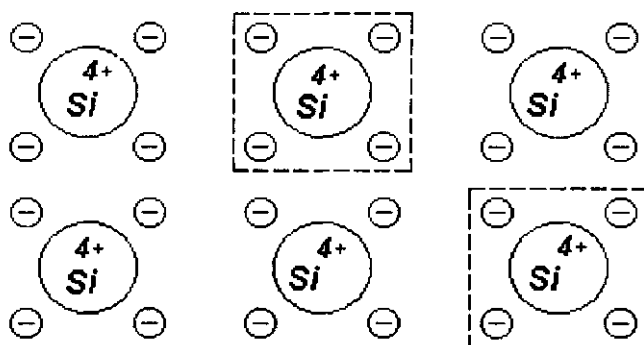
## 5. Elementy i układy energoelektroniczne

### 5.1. Elementy półprzewodnikowe

#### 5.1.1. Wprowadzenie

We współczesnej elektrotechnice coraz większą rolę odgrywają **prze-kształtniki energoelektroniczne** — układy wykorzystujące w budowie **elementy półprzewodnikowe mocy** (diody prostownicze, tyrystory, tranzystory mocy) i służące do zmiany parametrów energii elektrycznej. Przez określenie: parametry energii elektrycznej należy rozumieć wartość napięcia, rodzaj oraz kształt prądu (np. stały, przemienny, sinusoidalny, impulsowy), częstotliwość i liczbę faz. **Elementy energoelektroniczne pracują w dwóch stanach — odcięcia lub przewodzenia, czyli jako klucze przełączające.**

Do budowy elementów elektronicznych i energoelektronicznych najczęściej wykorzystuje się krzem - pierwiastek z grupy IV układu okresowego (czterowartościowy). Rozmieszczenie atomów w kryształach krzemu jest przestrzennie uporządkowane i w stanie czystym nie posiadają one nośników prądu elektrycznego, a więc nie przewodzi (rys. 5.1).

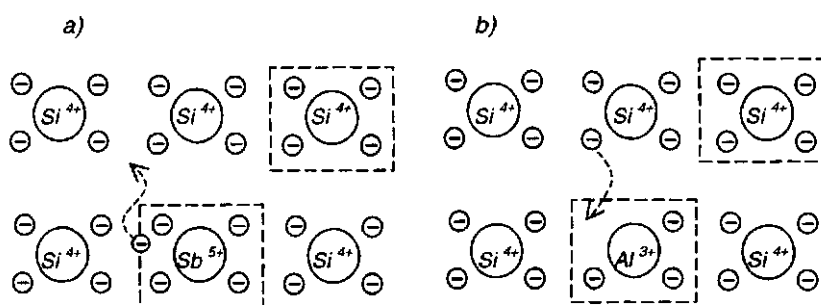


Rys. 5.1. Uporządkowana siatka krystaliczna półprzewodnika

Jeżeli jednak w sposób celowy wprowadzimy do kryształu krzemu domieszkę w postaci atomów pierwiastka z grupy V układu okresowego (np. antymon), to w siatce krystalicznej powstanie nadmiar elektronów (rys. 5.2 a). Te elektrony mogą swobodnie poruszać się nawet w niskich temperaturach. Uporządkowany kierunek przepływu może nastąpić jedynie pod wpływem sił pola elektrycznego. Kryształy, w których nośnikami ładunku elektrycznego są elektrony, nazywamy **półprzewodnikami typu *n*** (ang. *negative*).

Jeżeli natomiast do kryształu krzemu wprowadzimy jako domieszkę atomy pierwiastka z grupy III układu periodycznego (np. glin), to w siatce krystalicznej powstanie niedobór elektronów. Wolne miejsce jako niedobór elektronów nazywamy dziurą. Tę dziurę może zająć elektron z sąsiedniego atomu, pozostawiając po sobie dziurę, którą z kolei może zająć następny elektron itd. Zmianę miejsca powstawania dziury możemy uznać za ruch ładunku dodatniego. Kryształy o takim przewodnictwie nazywamy **półprzewodnikami typu *p*** (ang. *positive*).

Elementy elektroniczne budowano dawniej również z germanu, ale praktycznie nie są już one stosowane ze względu na gorsze od krzemu właściwości, np. dopuszczalna temperatura złącz opartych na germanie wynosi  $75^{\circ}\text{C}$ , a dla złącz opartych na krzemie  $160^{\circ}\text{C}$ .

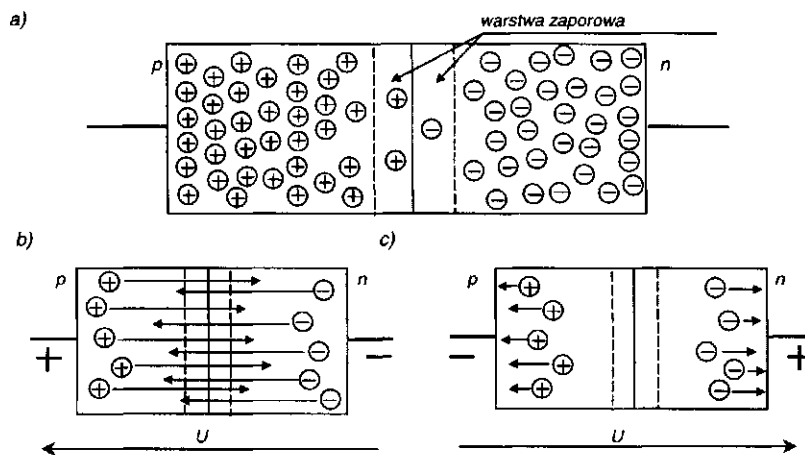


Rys. 5.2. Półprzewodniki typu *n* (a) i typu *p* (b)

### 5.1.2. Złącze *p-n*

Jeżeli połączymy bezpośrednio półprzewodnik typu *p* z półprzewodnikiem typu *n*, na styku warstw półprzewodników powstanie **złącze *p-n***. W złączu *p-n* na styku warstw *p* i *n* powstaje wewnętrzne pole elektryczne, skierowane w ten sposób, że zapobiega dyfuzji elektronów z warstwy *n* (gdzie jest ich dużo) do warstwy *p* (gdzie jest ich mało) oraz dziur z warstwy *p* do warstwy *n*. Wewnętrzne pole elektryczne zwane **barierą potencjału** wytwarzają zgromadzone

po obu stronach granicy warstw ładunki elektryczne o przeciwnym znaku do nośników większościowych warstwy. Tak więc po stronie warstwy  $p$  zgromadzą się ładunki ujemne - elektrony, a po stronie warstwy  $n$  - ładunki dodatnie - dziury. Dzieje się tak dlatego, że duża koncentracja nośników (zarówno większościowych, jak i mniejszościowych) występująca na granicy warstw powoduje silną dyfuzję nośników w obu kierunkach. Dziury z warstwy  $p$  przedostają się do warstwy  $n$  i łącząc się z elektronami znikają na skutek rekombinacji, zmniejszając liczbę swobodnych elektronów. Podobnie wolne elektrony przedostające się z warstwy  $n$  do warstwy  $p$  znikają wskutek rekombinacji w tej drugiej warstwie, zmniejszając liczbę swobodnych dziur. W wyniku tego mechanizmu na granicy warstw tworzy się obszar (zwany też warstwą zaporową) z małą ilością swobodnych nośników prądu, zachowujący się jak element o pewnej rezystancji. Przedstawia to schematycznie rys. 5,3 a.



Rys. 5.3. Złącze  $p$ - $n$ : a) złącze niespolaryzowane; b) polaryzacja w kierunku przewodzenia; c) polaryzacja zaporowa

Poddając złącze  $p$ - $n$  działaniu zewnętrznego pola elektrycznego w dwóch przeciwnych kierunkach, otrzymamy różne efekty zewnętrzne. Jeżeli do złącza  $p$ - $n$  przyłożymy napięcie tak, by biegun dodatni występował na warstwie  $p$  a ujemny na warstwie  $n$ , to pole zewnętrzne osłabi pole wewnętrzne (obniży barierę potencjału) i ładunki ujemne zewnętrzne będą przemieszczały się do bieguna dodatniego, a dziury „+” do bieguna ujemnego (rys. 5.3 b). Rezystancja złącza będzie bardzo mała i przy przyłożonym nawet niewielkim napięciu z obwodu zewnętrznego popłynie prąd, którego wartość *zależy* od parametrów obwodu zewnętrznego. Taką sytuację nazywamy **polaryzacją przewodzenia**.

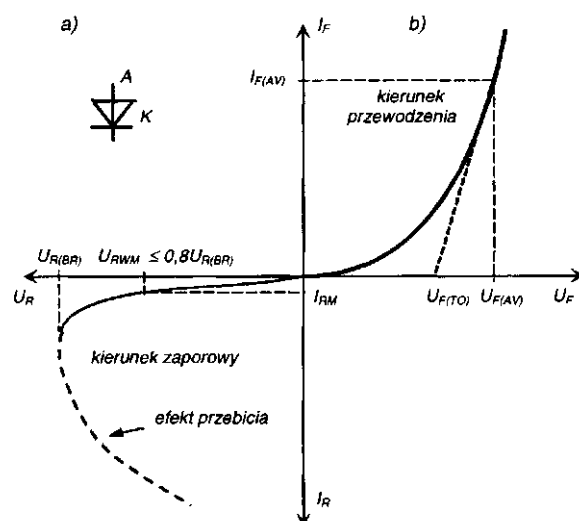
Jeżeli zmienimy kierunek przyłożonego napięcia z obwodu zewnętrznego tak, żeby do warstwy  $p$  przyłożyć napięcie ujemne, a do warstwy  $n$  napięcie

dodatnie, to ładunki ujemne w warstwie  $n$  przemieszczą się w kierunku bieguna dodatniego, a ładunki dodatnie w warstwie  $p$  w kierunku bieguna ujemnego (rys. 5.3 c). Pośrodku złącza powstanie strefa pozbawiona nośników prądu (elektrony, dziury). Rezystancja złącza w takim przypadku jest bardzo duża, a więc złącze praktycznie nie przewodzi prądu elektrycznego. Taką sytuację nazywamy **polaryzacją zaporową**.

### 5.1.3. Dioda prostownicza

Element, w którym wykorzystuje się pojedyncze złącze  $p-n$  nazywamy **diodą**. Rysunek 5.4 przedstawia charakterystykę prądowo-napięciową diody prostowniczej. W kierunku przewodzenia prąd zaczyna płynąć nie od napięcia równego zero, lecz od wartości określonej  $U_{F(TO)} \sim 0,4 \text{ V}$ , a spadek napięcia w czasie przewodzenia nawet dużych prądów wynosi  $0,6$  -  $1,4 \text{ V}$ .

Dioda półprzewodnikowa ma właściwości jednokierunkowego przewodzenia i po włączeniu jej w obwód zasilany napięciem przemiennym, działa jak prostownik jednopółkowy, dlatego też zwykłą diodę półprzewodnikową nazywa się **diodą prostowniczą**.



Rys.5.4. Dioda prostownicza:

a) oznaczenie; b) charakterystyka prądowo-napięciowa; - średni  $I_{F(AV)}$  prąd przewodzenia,  $U_{F(AV)}$  - średnie napięcie przewodzenia,  $U_{F(TO)}$  - napięcie progowe przewodzenia,  $U_{R(BK)}$  - napięcie przebicia,  $U_{RWM}$  - szczytowe wsteczne napięcie pracy,  $I_{KM}$  - szczytowy prąd wsteczny

Własności elektryczne diody prostowniczej określone są przez podstawowe parametry pracy w kierunku przewodzenia:

$U_{F(AV)}$  – średnie napięcie przewodzenia;

$I_{F(AV)}$  – średni prąd przewodzenia;

oraz w kierunku zaporowym:

$U_{RWM}$  – szczytowe wsteczne napięcie pracy,

$U_{R(BR)}$  – napięcie przebicia,

$I_{RM}$  – szczytowy prąd wsteczny.

Szczytowe wsteczne napięcie pracy przyjmuje się w wysokości około 80% napięcia przebicia. Przekroczenie przez napięcie wsteczne napięcia przebicia powoduje zniszczenie diody. Charakterystyka prądowo-napięciowa diody została przedstawiona na rys. 5.4.

#### 5.1.4. Dioda Zenera (stabilistor)

Diody Zenera (zwane też stabilistorami) są to diody, w których pracy wykorzystuje się kierunek zaporowy (wsteczny) złącza *p-n*. Przy odpowiednim napięciu zaporowym prąd wsteczny gwałtownie wzrasta (zjawisko to nosi nazwę efektu Zenera). Wartość napięcia, przy którym następuje gwałtowny wzrost prądu, jest stała i nie zależy od zmian prądu w szerokich granicach. Procesy zachodzące w diodzie Zenera podczas tego zjawiska są odwracalne pod warunkiem nie przekroczenia dopuszczalnej temperatury złącza. Warunki pracy diody Zenera w kierunku zaporowym określone są następującym i parametrami:

$U_Z$  – napięcie Zenera,

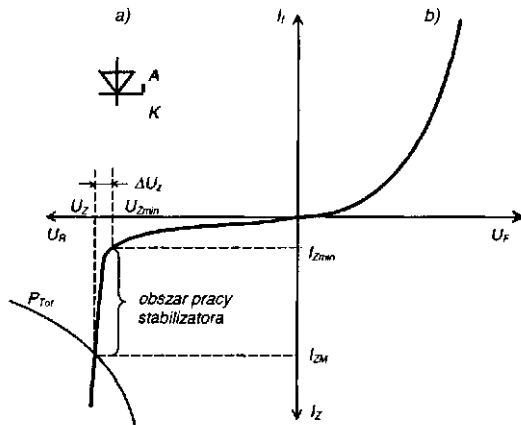
$P_{tot}$  – dopuszczalna moc wydzielana na diodzie,

$I_{ZM}$  – dopuszczalny prąd stabilizacji:

$$I_{ZM} = \frac{P_{tot}}{U_Z} \quad (5.1)$$

A f/z - zakres napięcia stabilizacji.

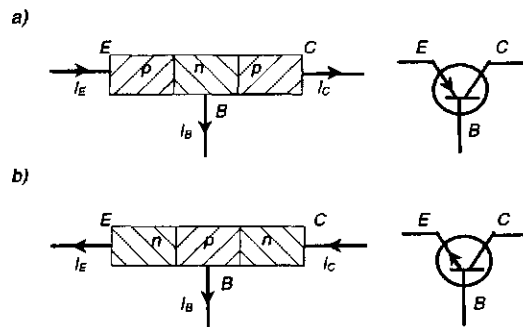
Za minimalną wartość prądu stabilizacji przyjmuje się  $I_{Zmin} = 0,1 I_{ZM}$ . Dla prądów mniejszych od  $I_{Zmin}$  spadek napięcia na diodzie jest silnie zależny od prądu diody. Charakterystykę prądowo-napięciową diody Zenera przedstawia rys. 5.5. Diody Zenera są stosowane w elektronice do stabilizacji napięć stałych, jako wzorce napięcia (napięcie odniesienia) oraz w układach ograniczających napięcie.



Rys. 5.5. Dioda Zenera: a) oznaczenie; b) charakterystyka prądowo-napięciowa;  
 $U_z > U_{zmm}$  - graniczne napięcia Zenera (stabilizacji), dopuszczalny prąd stabilizacji,  $P_{tot}$  ~ dopuszczalna moc strat diody

### 5.1.5. Tranzystory bipolarne klasyczne

Tranzystor bipolarny BT (ang. *bipolar transistor*) jest półprzewodnikowym elementem dwuzłączowym o strukturze *p-n-p* lub *n-p-n* (rys. 5.6), w którym kolejne warstwy noszą nazwy: emiter (*E*), baza (*B*) i kolektor (*C*). Złącze emiter-baza (*E-B*) jest polaryzowane w kierunku przewodzenia, a złącze kolektor-baza (*C-B*) w kierunku wstecznym (zaporowym). Tranzystory BT są użytkowane w elektronice jako elementy wzmacniające, regulacyjne i łącznikowe.

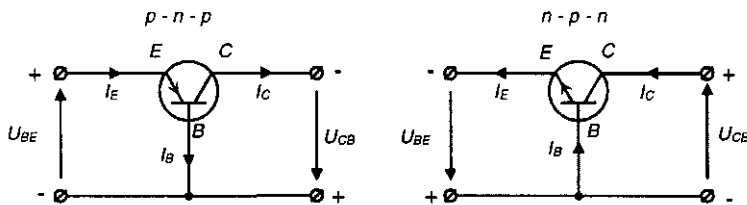


Rys. 5.6. Struktury i oznaczenia tranzystora bipolarnego: a) struktura *p-n-p*, b) struktura *n-p-n*



W tranzystorze występuje 6 zmiennych wielkości:  $I_C$  - prąd kolektora,  $I_B$  - prąd bazy,  $I_E$  - prąd emitera,  $U_{BE}$  - napięcie baza - emiter,  $U_{BC}$  - napięcie baza - kolektor,  $U_{CE}$  - napięcie kolektor - emiter.

Jako element o trzech elektrodach tranzystor może pracować w układzie czwórnika, wykorzystując jedną z nich jako wspólną. Otrzymuje się w ten sposób trzy konfiguracje pracy tranzystora, noszące nazwy: wspólna baza (OB), wspólny kolektor (OC) i wspólny emiter (OE). Połączenia tranzystora w układzie wspólnej bazy przedstawia rys. 5.7.



Rys. 5.7. Połączenia tranzystora w układzie wspólnej bazy (OB)

Przy prądzie bazy równym zero ( $I_B = 0$ ) tranzystor w obwodzie emiter-kolektor E-C praktycznie nie przewodzi, dopiero po pojawieniu się tego prądu przewodzi złącze baza - kolektor i cały obwód E-C.

W układzie tym prąd emitera jest równy sumie dwu pozostałych prądów:

$$I_E = I_C + I_B$$

a współczynnik wzmocnienia prądowego  $\alpha$  (w przypadku rozpatrywania tranzystora jako czwórnika oznaczany przez  $h_{21B}$ ) wynosi:

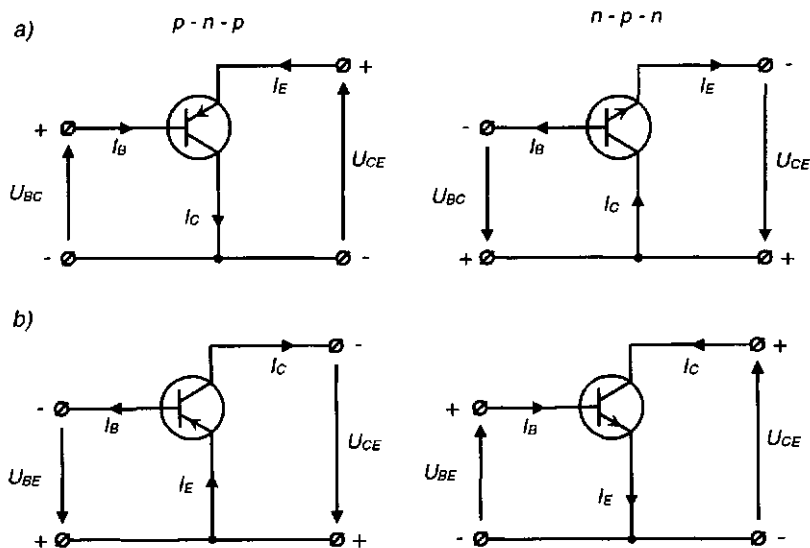
$$\alpha = h_{21B} = \frac{I_C}{I_E} \Big|_{U_{CB}=\text{const}} = \frac{I_C}{I_C + I_B} < 1 \quad (5.2)$$

Wartość  $\alpha$  wynosi zazwyczaj od 0,96 do 0,98.

We wzmacniaczach elektronicznych tranzystory pracują najczęściej w układach wspólnego emitera lub wspólnego kolektora (rys. 5.8). W układzie wspólnego emitera (rys. 5.8 b) współczynnik wzmocnienia prądowego  $\beta$  (przy rozpatrywaniu tranzystora jako czwórnika oznaczany przez  $h_{21E}$ ) wynosi:

$$\beta = h_{21E} = \frac{I_C}{I_B} \Big|_{U_{CE}=\text{const}} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \gg 1 \quad (5.3)$$

Wartość  $\beta$  wynosi zazwyczaj od 60 do 1000.



Rys. 5.8. Układy połączeń tranzystora: a) układ wspólnego kolektora (OC); b) układ wspólnego emitera (OE)

Dla najczęściej stosowanych konfiguracji *OE* i *OC* określa się charakterystyki statyczne (rys. 5.9) m. in.:

- charakterystyka wejściowa  $I_B = f(U_{BE})_{U_{CE} = const}$ ,
- charakterystyka przejściowa  $I_C = f(I_B)_{U_{CE} = const}$ .

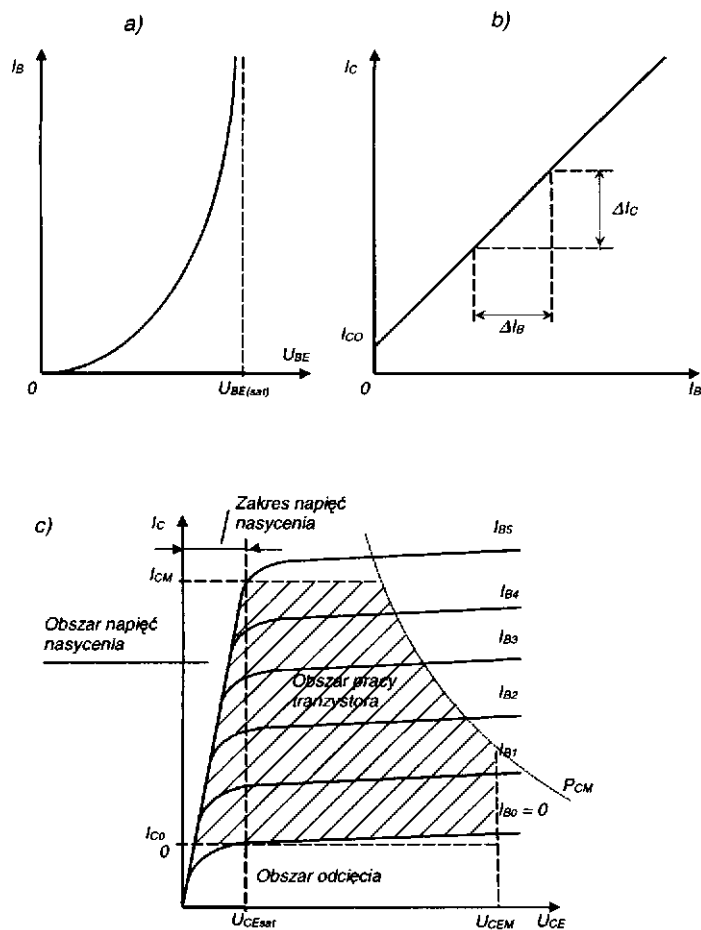
### 5.1.6. Tranzystory mocy

W układach energoelektronicznych stosuje się tranzystory mocy, wśród których wyróżniamy: bipolarne tranzystory mocy, unipolarne tranzystory polowe i tranzystory z izolowaną bramką.

**Bipolarny tranzystor mocy BT** (*Bipolar Transistor*) zasadą działania oraz charakterystykami przypomina tranzystor klasyczny, ale jest wykonany na znacznie większe prądy i napięcia, ponadto w układach energoelektronicznych pracuje jako **klucz przełączający** (tzn. pracuje tylko w stanie odcinania lub w stanie nasycenia).

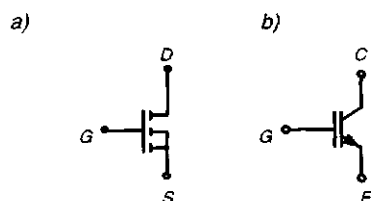
**Tranzystory polowe mocy MOSFET** (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) są tranzystorami w których wykorzystuje się zjawiska elektryczne w warstwach przypowierzchniowych półprzewodników. Tranzystory te są tranzystorami unipolarnymi; nośnikami ładunku elektrycznego (w tranzystorach unipolarnych) są tylko dziury lub tylko elektrony, a nie dziury i elektrony jak w tranzystorach bipolarnych. Tranzystory polowe mają inne oznaczenia

elektrod (rys. 5.10 a). Są to **źródło S (Source)** i **dren D (Drain)**, zaś elektroda sterująca nosi nazwę **bramki G (Gate)**. Charakteryzują się bardzo krótkimi czasami przełączania między stanami przewodzenia i odcięcia - rzędu kilkudziesięciu ns.



Rys. 5.9. Charakterystyki tranzystora bipolarnego w układzie OE: a) charakterystyka wejściowa (przy  $U_{CE} = \text{const}$ ), b) charakterystyka przejściowa (przy  $U_{CE} = \text{const}$ ), c) charakterystyka wyjściowa;  $I_{C0}$  - zerowy prąd kolektora,  $I_{CM}$  - maksymalny prąd kolektora,  $U_{CE(sat)}$  - maksymalne napięcie nasycenia,  $U_{CEM}$  - maksymalne dopuszczalne napięcie kolektor-emiter,  $P_{CM}$  - dopuszczalna największa moc wydzielana na kolektorze

**Tranzystory z izolowaną bramką IGBT** (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) łączą korzystne właściwości tranzystorów bipolarnych i polowych. Są to tranzystory mogące pracować jako klucze przełączające z częstotliwościami nawet ponad 100 kHz, przy napięciach do 1000 V i prądach wielkości setek amperów. Tranzystory te w ostatnich latach wypierają tyrystory stosowane dotąd w układach średnich i wielkich mocy. Oznaczenia tranzystorów IGBT przedstawia rys. 5.10 b.



Rys. 5.10. Oznaczenia tranzystorów mocy typu MOSFET (a) i IGBT (b)

## Tyrystory

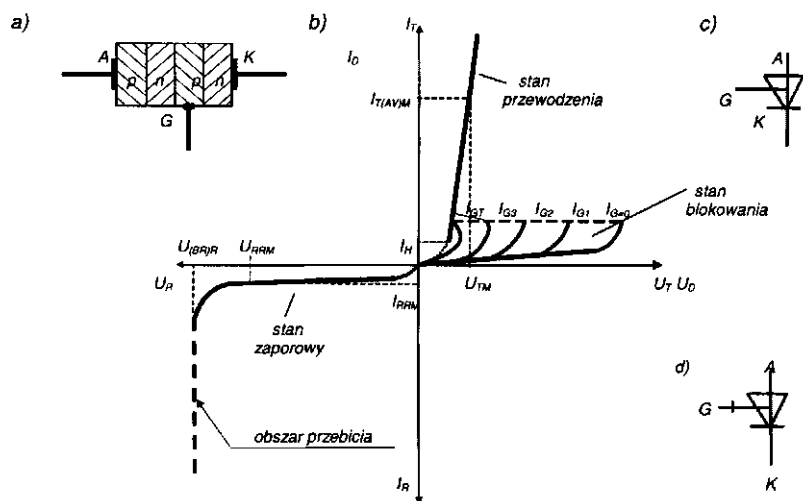
**Tyrystory klasyczne - SCR** (ang. *silicon controled rectifier*) są to sterowane elementy półprzewodnikowe o strukturze wielowarstwowej. Tyrystory jednokierunkowe SCR mają strukturę czterowarstwową *p-n-p-n*. Elektrody przyłączone do warstw skrajnych nazywa się **katodą K i anodą A**, a elektroda przyłączona do jednej z warstw środkowych **bramką G**. Strukturę tyrystora jednokierunkowego przedstawia rys. 5.11 a.

W czasie blokowania (nie przewodzenia) istnieje wewnątrz tyrystora bariera potencjału, uniemożliwiająca przepływ prądu. Załączenie tyrystora czyli wprowadzenie go w stan przewodzenia, wykonuje się likwidując barierę potencjału, przez doprowadzenie prądu sterującego (**prądu bramki**)  $I_G$  (doprowadzenie ładunku elektrycznego do strefy środkowej).

Charakterystykę prądowo-napięciową tyrystora przedstawia rysunek 5.11 b. Na charakterystyce można wyróżnić trzy obszary:

- stan blokowania w kierunku przewodzenia  $I_D = f(I_G)$ ,
- stan przewodzenia w kierunku przewodzenia  $I_T = f(U_T)$ ,
- stan zaporowy w kierunku wstecznym  $I_R = f(U_R)$ .

Tyrystor doprowadza się ze stanu blokowania do stanu przewodzenia przez doprowadzenie do obwodu bramki odpowiedniego prądu sterującego  $I_G$ , przy czym w stanie przewodzenia przerwanie prądu bramki lub jego zmniejszenie nie przywraca stanu blokowania. Tyrystor można również doprowadzić do stanu przewodzenia przez przekroczenie pewnej wartości napięcia blokowania, jednak w praktyce nie wykorzystuje się tego sposobu.



Rys. 5.11. Tyrystor jednokierunkowy klasyczny SCR:

a) struktura warstwowa; b) charakterystyka prądowo-napięciowa;  
 c) oznaczenie tyristora klasycznego; d) oznaczenie tyristora GTO;

- $U_{TM}$  - szczytowe napięcie przewodzenia,
- $U_{RRM}$  - powtarzalne szczytowe napięcie wsteczne,
- $U_{(BR)R}$  - napięcie przebicia,
- $I_{T(AV)M}$  - prąd graniczny (maksymalny średni prąd przewodzenia),
- $I_{RRM}$  - powtarzalny szczytowy prąd wsteczny,
- $I_{GT}$  - prąd bramki przełączający
- $I_H$  - prąd podtrzymania

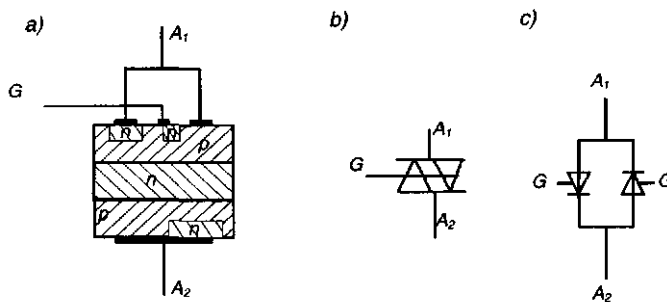
Przerwanie stanu przewodzenia tyrystora i przywrócenie go do stanu blokowania wymaga odrębnych procedur - albo przerwanie prądu w obwodzie anoda-katoda i zmiany polaryzacji w obwodzie A-K na zaporową (nazywa się to komutacją naturalną) lub za pomocą dodatkowego obwodu z innym tyrystorem (komutacja wymuszona).

Inicjacja stanów przewodzenia w obwodzie prądu przemiennego wymaga podawania na bramkę impulsów prądu bramkowego z częstotliwością równą częstotliwości napięcia zasilającego.

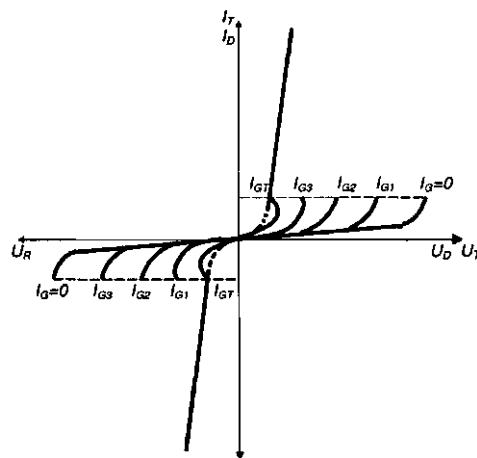
Tyrystory jednokierunkowe stosowane są w układach prostowników sterowanych i falowników oraz jako łączniki bezstykowe.

Tyrystory GTO (*Gate Turn-off*) są to tyrystory wyłączane obwodem bramki (bez konieczności zmiany polaryzacji niezbędnej w przypadku tyrystora klasycznego). Tyrystory GTO są załączane dodatnim impulsem prądu bramki, natomiast wyłączanie jest wymuszane impulsem ujemnym. Charakterystyka prądowo-napięciowa tyrystora GTO jest zbliżona do charakterystyki tyrystora klasycznego. Symbol tyrystora GTO zamieszczono na rys. 5.11 d.

Tyrystor jednokierunkowy działa jako prostownik, zatem aby wykorzystać jego własności regulacyjne w obwodach prądu przemiennego trzeba stosować dwa tyrystory włączone w odwrotnych kierunkach (tzw. para odwrotnie-równoległa - rys. 5.12 c), co jest niedogodne. Duże uproszczenie takich układów daje zastosowanie **tyrystora dwukierunkowego** (albo inaczej symetrycznego), elementu sterowanego przewodzącego prąd w obu kierunkach. Potocznie tyrystor taki jest nazywany **triakiem** (od nazwy handlowej wprowadzonej przez firmę General Electric - TRIAC: *Triode AC Switch*). Triak ma strukturę pięciowarstwową  $p-n-p-n-p$  i również trzy elektrody - dwie anody  $A_1$  i  $A_2$  oraz wspólną bramkę  $G$ . Charakterystykę prądowo-napięciową triaka przedstawia rys. 5.13. Triaki są wykorzystywane w bezstykowych łącznikach prądu przemiennego oraz regulatorach napięcia przemiennego (sterownikach napięcia).



Rys. 5.12. Tyrystor dwukierunkowy (triak): a) struktura warstwowa; b) oznaczenie; c) para odwrotnie-równoległa



Rys. 5.13. Charakterystyka prądowo-napięciową triaka (oznaczenia jak na rys. 5.14)

## 5.2. Przekształtniki energoelektroniczne

### 5.2.1. Funkcja przekształtnika energoelektronicznego

Przekształtnik elektroniczny składa się z:

- elementów półprzewodnikowych mocy (diody energetyczne, tranzystory mocy, tyrystory),
- elementów biernych (kondensatory, dławiki, transformatory),
- elektronicznego układu sterującego,
- aparatury łączeniowej, pomiarowej i sygnalizacyjnej.

Ogólny schemat blokowy przekształtnika energoelektronicznego przedstawia rys. 5.14.



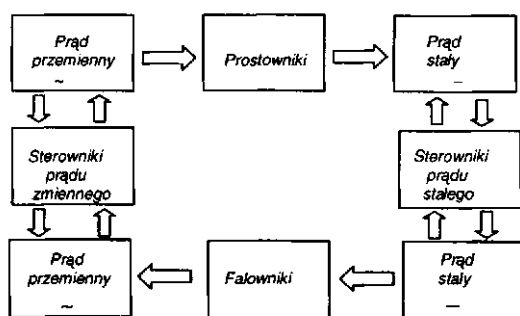
Rys. 5.14. Schemat blokowy przekształtnika

W zależności od spełnianych funkcji przekształtniki dzielą się na:

- prostowniki (sterowane i niesterowane),
- falowniki,
- sterowniki prądu stałego (inne nazwy - przerywacze, czopery),
- sterowniki prądu przemiennego.

Obecnie sterowanie przekształtnikami realizowane jest w większości przez układy mikroprocesorowe.

Schemat klasyfikacji przekształtników przedstawia rys. 5.15.



Rys. 5.15. Schemat blokowy klasyfikacji przekształtników

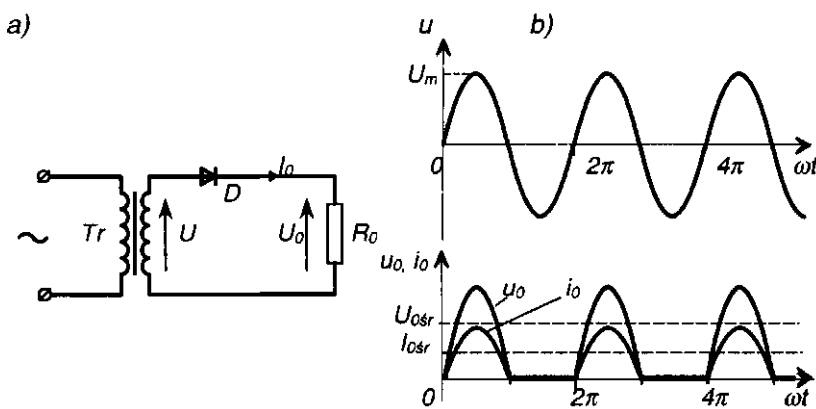
Poniżej zostały podane przykłady układów przekształtnikowych. Są to układy jednofazowe, możliwie najprostsze, omawiające tylko sarną ideę działania przekształtnika.

### 5.2.2. Prostowniki niesterowane

Prostowniki są to układy umożliwiające przepływ prądu jednokierunkowego w obwodzie zasilanym ze źródła napięcia przemiennego. Prostowniki niesterowane nie posiadają możliwości regulacji napięcia wyprostowanego w samym układzie prostownika (ale regulacja ta jest możliwa przez zmianę napięcia zasilającego prostownik - np. za pomocą autotransformatora lub innego układu regulującego napięcie przemiennie). Prostowniki przekształcają napięcie przemiennie na jednokierunkowe napięcie okresowo zmienne (pulsujące). Pod względem układu zasilania wyróżnia się prostowniki jednofazowe i wielofazowe. Natomiast ze względu na sposób prostowania, prostowniki dzieli się na prostowniki półokresowe (inne nazwy — jednopołówkowe, jednopulsowe) i pełno-okresowe (dwupołówkowe, dwupulsowe).

Prostowniki niesterowane przeważnie są zasilane z transformatorów dopasowujących napięcie zasilania do układu tak, by napięcie wyprostowane na wyjściu prostownika miało standardową wartość (np. 24 V).

Schemat podstawowy **prostownika jednopołówkowego** przedstawia rys. 5.16 a. W prostowniku tym dioda  $D$  przewodzi tylko w dodatnich półokresach napięcia zasilającego. Przebiegi czasowe napięć i prądu prostownika obciążonego rezystancją  $R_o$  przedstawia rys. 5.16 b.



Rys. 5.16. Prostownik niesterowany jednopołówkowy:  
a) schemat podstawowy; b) przebiegi czasowe napięcia zasilającego i prądu wyprostowanego



Wartość średnia napięcia wyprostowanego t/ośr obliczona zgodnie ze wzorem:

$$U_{0,śr} = \frac{1}{T} \int_0^T U_m \sin \omega t \cdot dt$$

wynosi:

$$U_{0,śr} = \frac{1}{\pi} U_m \approx 0,32 U_m \quad (5.5)$$

Wartość skuteczna napięcia wyprostowanego zgodnie ze wzorem:

$$U_0 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U_m^2 \sin^2 \omega t \cdot dt}$$

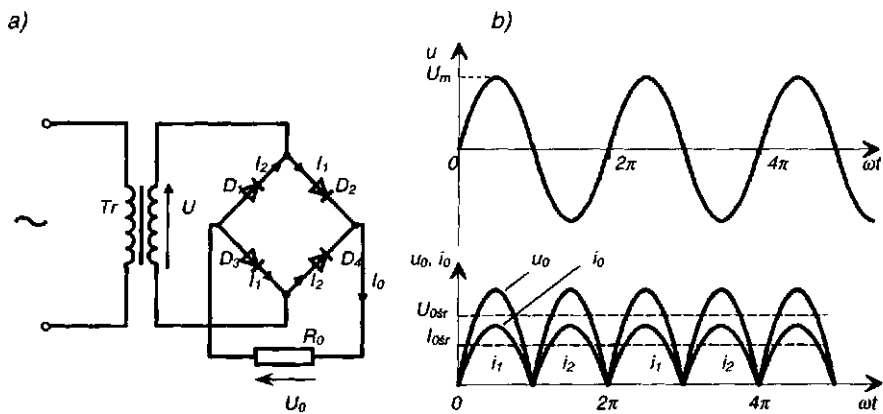
wynosi:

$$U_0 = \frac{1}{2} U_m$$

**Prostownik dwupołówkowy mostkowy** (nazywany potocznie mostkiem Graetza) składa się z czterech diod połączonych jak na rys. 5.17 b. W prostowniku mostkowym diody przewodzą parami na przemian - w półokresach dodatnich D2 i D3, a w półokresach ujemnych - D4 i D1. Przebiegi czasowe napięcia zasilającego  $U$  i prądu wyprostowanego / prostownika, przy obciążeniu rezystancją  $R_o$ , przedstawiono na rys. 5,17 b. Wartości średnia i skuteczna napięcia wyprostowanego, obliczone zgodnie ze wzorami (5.4, 5.6) dla prostownika mostkowego wynoszą:

$$U_{0,śr} = \frac{2}{\pi} U_m \approx 0,64 U_m \quad (5.8)$$

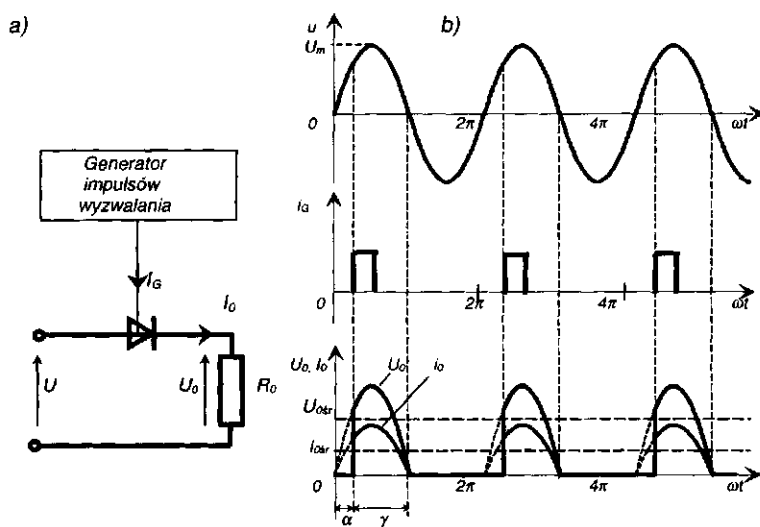
$$U_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m \approx 0,71 U_m \quad (5.9)$$



Rys. 5.17. Prostownik niesterowany dwupołwkowy mostkowy: a) schemat podstawowy; b) przebiegi czasowe napięcia zasilającego i prądu wyprostowanego

### 5.2.3. Prostowniki sterowane

Prostowniki sterowane mają możliwość regulacji napięcia wyprostowanego bez zmiany napięcia przemiennego zasilającego prostownik. Jednofazowy sterowany prostownik j ednopołwkowy przedstawiony jest na rys. 5.18.



Rys. 5.18. Prostownik sterowany: a) schemat podstawowy; b) przebiegi czasowe w prostowniku

Przy zasilaniu układu napięciem sinusoidalnym, prąd płynący przez odbiornik będzie zależny od **kąta opóźnienia  $\alpha$**  (zwanego też kątem załączenia) impulsów bramkowych  $I_G$  względem napięcia. Impulsy prądu bramkowego muszą za pomocą specjalnego układu być synchronizowane z przebiegiem czasowym napięcia zasilającego. Przebiegi czasowe prostownika sterowanego obciążonego rezystancją<sup>1</sup> przedstawione są na rys. 5.18 b. Regulację napięcia i prądu wyprostowanego uzyskuje się przez zmianę szerokości przepuszczanej przez diodę wyprostowanej części przebiegu (kąt  $\alpha$  na rysunku) a tym samym zmianę wartości średnich oraz skutecznego prądu i napięcia.

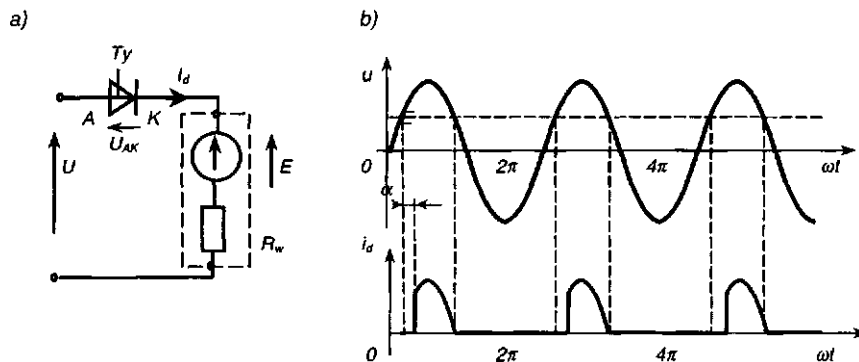
Wartość średnia/ośr prądu wyprostowanego wynosi:

$$U_{0sr} = \frac{1}{2\pi} U_m (1 + \cos \alpha) \quad (5.10)$$

#### 5.2.4. Praca prostownika sterowanego przy obciążeniu typu RE

Obciążenie typu RE (rezystancja + SEM) spotyka się najczęściej przy ładowaniu akumulatorów. Schemat układu i przebiegi podczas ładowania akumulatora o sile elektromotorycznej  $E$  i rezystancji wewnętrznej  $R_w$  przedstawia rys. 5.19. Napięcie na tyristorze ( $U_{AK}$ ) jest algebraiczną różnicą napięcia zasilającego oraz napięcia akumulatora. Tyristor przewodzi, gdy napięcie zasilania jest większe od SEM akumulatora (oraz gdy płynie prąd w obwodzie bramka - katoda).

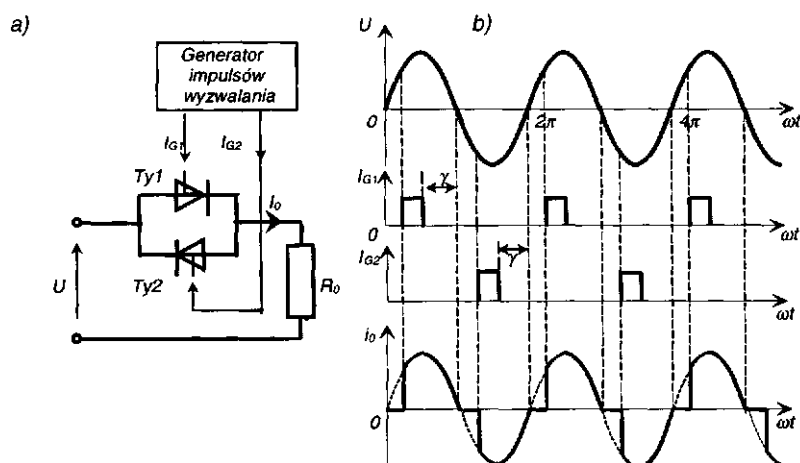
$$U_m \sin \omega t > E$$



Rys. 5.19. Ładowanie akumulatora prostownikiem sterowanym: a) schemat podstawowy układu; b) przebiegi czasowe w układzie

### 5.2.5. Sterowniki prądu przemiennego

Sterowniki prądu przemiennego są przekształtnikami służącymi do zmiany wartości skutecznej napięcia i prądu. Sterowanym elementem mocy w tych sterownikach są tyrystory (łączone w pary odwrotnie-równoległe), triaki lub tranzystory. Stosowanych jest kilka sposobów sterowania elementami mocy, jednym z nich jest sterowanie fazowe, w którym regulację wartości skutecznej napięcia i prądu uzyskuje się przez zmianę szerokości przepuszczanej przez element sterowany części przebiegu (kąt  $\gamma$  na rys. 5.20 b). Przykład sterownika prądu przemiennego obciążonego rezystancją oraz przebiegi czasowe w nim przedstawia rys. 5.20.

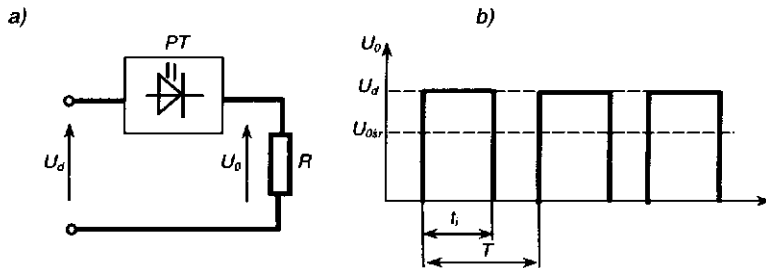


Rys. 5.20. Sterownik napięcia zmiennego: a) schemat podstawowy; b) przebiegi czasowe w sterowniku

### 5.2.6. Sterowniki prądu stałego

Sterowniki prądu stałego nazywane często przerywaczami (lub czoperami, ang. *choppers*) znajdują zastosowanie w napędach trakcyjnych prądu stałego (lokomotywy, tramwaje, pojazdy zasilane z akumulatorów), w których zachodzi konieczność płynnej regulacji napięcia stałego. Nazwa „przerywacze” wynika z ich impulsowej pracy. Zasadę działania przerywacza ilustruje rys. 5.21. Między źródło napięcia i odbiornik włączony jest sterowany impulsowo element mocy, który przerywa okresowo przebieg prądu. Jeżeli przez  $r$ , oznaczymy czas trwania impulsu napięciowego, a przez  $T$  — okres, to wartość średnią napięcia obciążenia można wyznaczyć z zależności:

$$U_{0sr} = U_d \frac{t_i}{T} \quad (5.11)$$



**Rys. 5.21.** Zasada działania przerywacza prądu stałego: a) uproszczony schemat; b) przebieg czasowy napięcia; PT — element przerywający

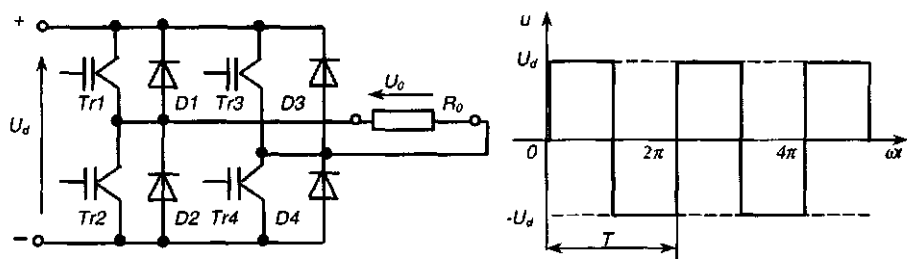
### 5.2.7. Falowniki

Falownik jest to przekształtnik energoelektroniczny służący do przetwarzania prądu stałego na prąd przemienny. W zależności od liczby faz wyróżnia się falowniki jednofazowe i trójfazowe.

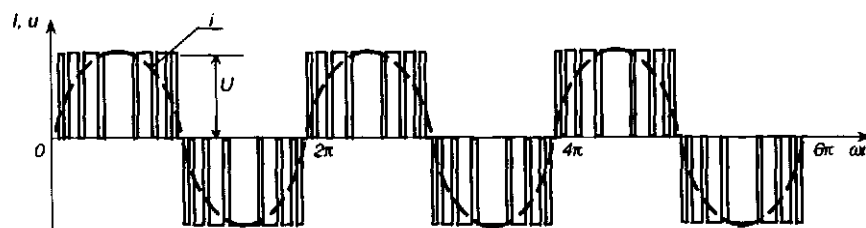
Falowniki wykorzystujące w budowie tyrystory klasyczne (SCR) w swej strukturze zawierają elementy obwodów wyłączających tyrystory, w związku z tym opis działania tych falowników oraz przebiegi prądów i napięć w nich są złożone. Znacznie prostsze w realizacji są falowniki wykorzystujące tyrystory wyłączalne GTO lub tranzystory mocy IGBT. Ta grupa falowników rozwija się szybko w ostatnich latach i wypiera falowniki zbudowane z tyrystorów SCR.

Zasada przetwarzania prądu stałego na zmienny w falowniku została przedstawiona na rys. 5.22. Pary tranzystorów  $7>1$  i  $7>4$  oraz  $7>2$  i  $7>3$  włączane są na przemian, wytwarzając zmienne napięcie o kształcie prostokątnym. Dla uzyskania sinusoidalnego kształtu napięcia zmiennego należy stosować filtry pojemnościowo-indukcyjne, dobrane na częstotliwość pierwszej harmonicznej przebiegu.

We współczesnych konstrukcjach falowników budowanych z tranzystorów IGBT stosuje się metodę kształtowania zawartości wyższych harmonicznych napięcia i jednoczesnego sterowania amplitudy pierwszej harmonicznej przez modulację szerokości impulsów (PWM). Zasadę modulacji impulsowej obrazuje przebieg na rys. 5.23.



Rys. 5.22. Zasada działania falownika:  $7V1, 7V2, Tr3, Tr4$  - tranzystory,  $D1, D2, D3, D4$  - diody blokujące,  $R_0$  - obciążenie



Rys. 5.23. Przebiegi napięcia wyjściowego i prądu obciążenia falownika PWM

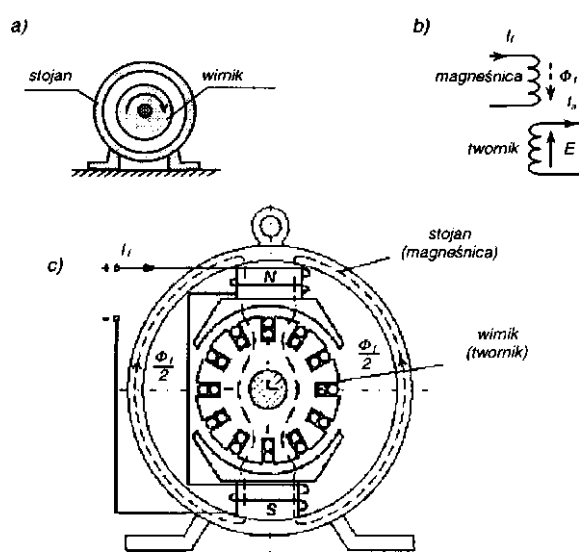
## 6. Maszyny prądu stałego

### 6.1. Prądnice prądu stałego

#### 6.1.1. Struktura maszyny prądu stałego

W maszynie elektrycznej wyróżniamy, ze względu na konstrukcję mechaniczną, część nieruchomą- **stojan**, oraz część wirującą- **wirnik**. Natomiast ze względu na strukturę elektryczną maszyna składa się z części, w której wytwarzane jest pole magnetyczne (strumień magnetyczny wzbudzenia) - **magneśnica** oraz części, w której indukuje się siłę elektromotoryczną— twornik.

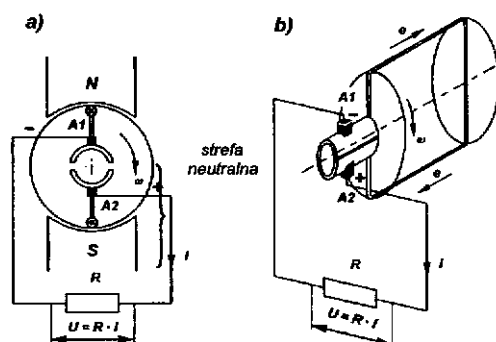
W maszynach prądu stałego zazwyczaj stojan jest magneśnica a wirnik - twornikiem. Ilustruje to ogólnie rys. 6.1.



Rys. 6. 1. Podstawowe części maszyny elektrycznej; a) struktura mechaniczna; b) struktura elektryczna; c) struktura maszyny prądu stałego

Uzwojenie wzbudzenia (magneśnica) nawinięte jest na biegunach złożonych z izolowanych blach elektrotechnicznych (zwanych inaczej transformatorowymi) o grubości 0,5 — 2 mm, umocowanych do korpusu wykonanego jako odlew żeliwny. Do uzwojenia tego doprowadza się prąd stały // zwany **prądem wzbudzenia** (lub prądem magnesującym).

Uzwojenie twornika umieszczone jest w żłobkach wirnika, który też jest złożony z blach elektrotechnicznych (o grubości 0,35 - 0,5 mm) - zmniejsza to istotnie straty mocy w stali. Końcówki tego uzwojenia są podłączone do działek komutatora, pełniącego rolę prostownika mechanicznego. Pokazano to na rys. 6.2 dla najprostszego komutatora, składającego się z dwóch wycinków (półpięści) izolowanych od siebie, do których są dołączone końcówki uzwojenia twornika składającego się z jednego zwoju. Komutator obraca się razem z uzwojeniami twornika. Do komutatora przylegają szczotki, które stanowią główne wyprowadzenie energii elektrycznej wytwarzanej w tworniku lub doprowadzenie tej energii przy pracy silnikowej.



Rys. 6.2. Zasada działania komutatora: a) widok z przodu; b) widok perspektywiczny

W czasie obrotu zwój zmienia swoje położenie względem nieruchomego pola magnetycznego, zatem następuje w nim zmiana kierunku prądu, gdy dany bok zwoju przechodzi spod wpływu np. bieguna N pod wpływ bieguna S. Zmiana kierunku prądu (zjawisko to nazywa się **komutacją**) zachodzi wtedy, gdy zwój znajduje się w tzw. strefie neutralnej, w której boki cewki poruszają się wzdłuż linii sił pola magnetycznego, a więc nie przecinają linii sił pola, zatem:

$$\frac{d\Phi}{dt} = 0 \quad (6.1)$$



Szczotki zwierają dwa sąsiednie wycinki komutatora, gdy zwój do nich dołączony znajduje się w strefie neutralnej i jeżeli nie jest spełniony warunek strefy neutralnej (6.1) w zwartym zwoju powstają dodatkowe prądy utrudniające zmianę kierunku prądu w zwoju. Objawia się to występowaniem silnego iskrzenia pod szczotkami.

**Budowa prądnicy i silnika prądu stałego jest taka sama**, bowiem maszyna jest odwracalna i może pracować jako prądnica lub silnik (podobnie jak każda wirująca maszyna elektryczna).

Jeśli wirnik prądnicy będzie obracany przez silnik napędowy prądnicy, uzwojenie twornika zacznie przecinać linie pola magnetycznego wytworzonego przez magnesnicę z prędkością kątową  $\omega$  i zaindukuje się w nim siła elektromagnetyczna zgodnie z prawem indukcji elektromagnetycznej, czyli:

$$e = -\frac{d\Phi_f}{dt} \approx -\frac{\Delta\Phi_f}{\Delta t}$$

a po scałkowaniu:

$$E = k \cdot \Phi_f \cdot \omega \quad (6.3)$$

lub po zastąpieniu prędkości kątowej prędkością obrotową [1/min]:

$$E = c_e \cdot \Phi_f \cdot n \quad (6.4)$$

gdzie:  $k$ ,  $c_e$  - stałe zależne od konstrukcji uzwojenia ( $c_e$  jest nazywana stałą elektryczną maszyny).

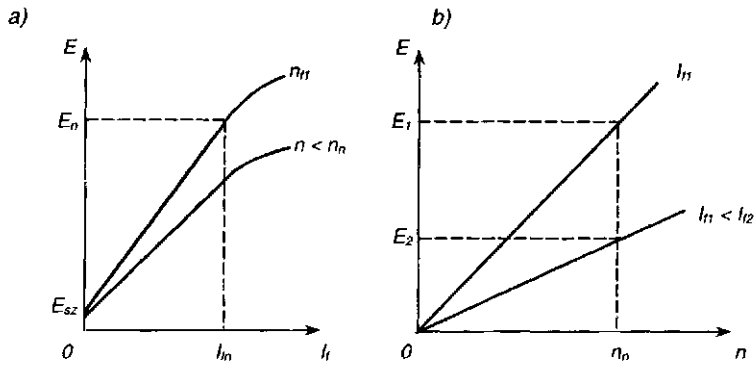
Aby otrzymać napięcie wyjściowe o małych pulsacjach czyli wygładzone, należy zastosować uzwojenie twornika o dużej liczbie zwojów rozmieszczonych w licznych żłobkach i połączonych z komutatorem o znacznej liczbie wycinków.

Uszkodzenie uzwojeń prądnicy (zwarcie lub przerwa) wymaga z reguły poważnej naprawy, którą jest przewinięcie całego uzwojenia.

Strumień magnetyczny  $\Phi$  jest wywołany przez prąd wzbudzenia // więc na podstawie wzoru (6.4) można dokonać regulacji wartości SEM za pomocą prądu wzbudzenia//lub prędkości obrotowej  $n$  (rys. 6.3).

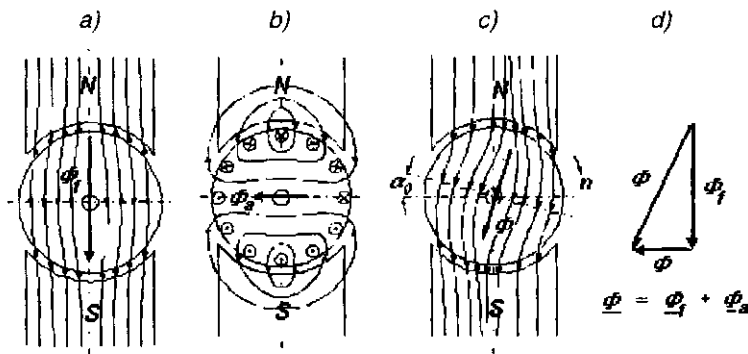
Wytwarzana siła elektromotoryczna  $E$  nie jest jednak wprost proporcjonalna do wartości prądu // (rys. 6.3 a), bowiem występuje zjawisko nasycenia magnetycznego żelaza i indukcja magnetyczna nie wzrasta proporcjonalnie do wartości //.

Magnesowanie ciał ferromagnetycznych przebiega według pętli histerezy magnetycznej (patrz rozdz. 2.1.5). Po wyłączeniu prądu wzbudzenia ( $I = 0$ ) w obwodzie magnetycznym maszyny pozostaje pewien magnetyzm szczątkowy, określający szczątkową siłę elektromotoryczną  $E_{sz}$ . Umożliwia ona samowzbudzenie prądnic samowzbudnych przy ponownym uruchomieniu.



Rys. 6.3. Regulacja wartości SEM: a) w zależności od prądu wzbudzenia //•; b) prędkości obrotowej  $n$

Po obciążeniu prądnicy popłynie prąd twornika  $I_w$ , który wytworzy strumień magnetyczny  $\langle P_n$  poprzecznie skierowany do strumienia głównego  $\langle 0$ . Jest to tzw. **strumień reakcji twornika** (oddziaływanie twornika). Wektory obu tych strumieni dodają się geometrycznie dając strumień wypadkowy, który powoduje przesunięcie strefy neutralnej w maszynie o kąt  $a$  w kierunku wirowania w przypadku prądnic, i w kierunku przeciwnym dla silników. Komutacja będzie wówczas zachodziła z komplikacjami i wystąpi szkodliwe iskrzenie pod szczotkami. Zjawisko to należy eliminować, gdyż powoduje wypalanie szczotek i izolacji między działkami komutatora. Proces powstawania reakcji twornika pokazano na rys. 6.4.



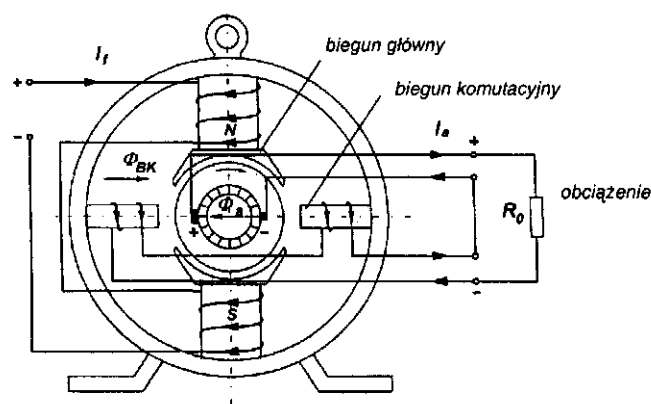
Rys. 6.4. Oddziaływanie twornika:

- a) strumień magnetyczny  $\langle A_0$ ;
- b) strumień reakcji twornika  $\langle P_0$ ;
- c) strumień wypadkowy  $\langle J \rangle$ ; d) wykres wskazowy strumieni

W celu ograniczenia wpływu reakcji twornika na komutację stosuje się najczęściej bieguny dodatkowe zwane komutacyjnymi. Nawinięte na nich uzwojenie komutacyjne jest połączone szeregowo z twornikiem, lecz wytwarza strumień  $\Phi_{BK}$  przeciwnie skierowany do  $\Phi_a$  o tej samej wartości, czyli kompensujący wpływ reakcji twornika. Budowę maszyny z biegunami komutacyjnymi pokazano na rys.6.5.

W maszynach prądu stałego dużych mocy dla zmniejszenia wpływu oddziaływania twornika stosuje się dodatkowo uzwojenie kompensacyjne, umieszczone w nabiegownikach uzwojenia wzbudzenia, połączone szeregowo z twornikiem i wytwarzające strumień magnetyczny, skierowany przeciwnie do strumienia reakcji twornika.

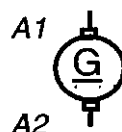
Liczba par biegunów głównych maszyny może być większa od jedności ( $p > 1$ ), jak to dotychczas pokazano na rys. 6.1 i 6.5, lecz wówczas liczba par biegunów komutacyjnych i liczba par szczotek musi być taka sama.



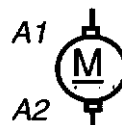
Rys. 6.5. Maszyna z biegunami komutacyjnymi

Na schematach elektrycznych obowiązują następujące symbole graficzne uzwojeń maszyn prądu stałego i oznaczenia ich końcówek.

Wirnik prądnicy prądu stałego

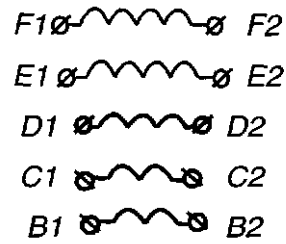


Wirnik silnika prądu stałego

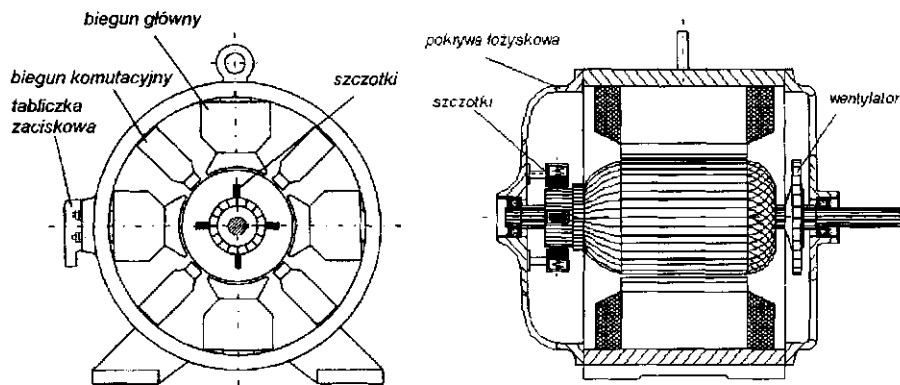


Uzwojenia maszyny:

- a) uzwojenie wzbudzenia obce
- b) uzwojenia wzbudzenia bocznikowe
- c) uzwojenie wzbudzenia szeregowo
- d) uzwojenie kompensacyjne
- e) uzwojenie komutacyjne



Uproszczony przekrój maszyny prądu stałego o liczbie par biegunów  $p = 2$  pokazano na rys. 6.6. Na wale wirnika jest osadzony wentylator do przewietrzania (chłodzenia) własnego podczas pracy maszyny. Wentylacja maszyny jest konieczna do odprowadzania ciepła wydzielanego przez straty mocy w uzwojeniach oraz obwodzie magnetycznym maszyny.



Rys. 6.6. Przekroje maszyny prądu stałego

W prądnicie obciążonej na przewody uzwojenia twornika umieszczone w polu magnetycznym głównym, w którym płynie prąd  $I$ , działa siła  $F$  według wzoru (2.34):

$$F = N \cdot B I_a \cdot l$$

gdzie:

$l$  - długość przewodu,  $N$  - ilość zwojów.

Zwrot tej siły określa się na podstawie **reguły lewej dłoni** i w przypadku prądnicy jest on przeciwny do kierunku ruchu. Powstaje więc moment elektromagnetyczny, będący momentem hamującym dla silnika napędowego prądnicy. W przypadku silnika będzie to **moment napędowy**, nadający ruch wirowy. W obu przypadkach wyraża się on wzorem:

$$M = c_m \cdot \Phi_f \cdot I_a \quad (6.5)$$

gdzie:  $c_m$  - stała zależna od konstrukcji uzwojenia silnika (tzw. stała elektromechaniczna maszyny).

Prądnice prądu stałego ogólnie dzieli się na **obcowzbudne i samowzbudne** w zależności od sposobu realizacji wzbudzenia. Prądnice samowzbudne dzielą się natomiast na **bocznikowe, szeregowo i szeregowo-bocznikowe**.

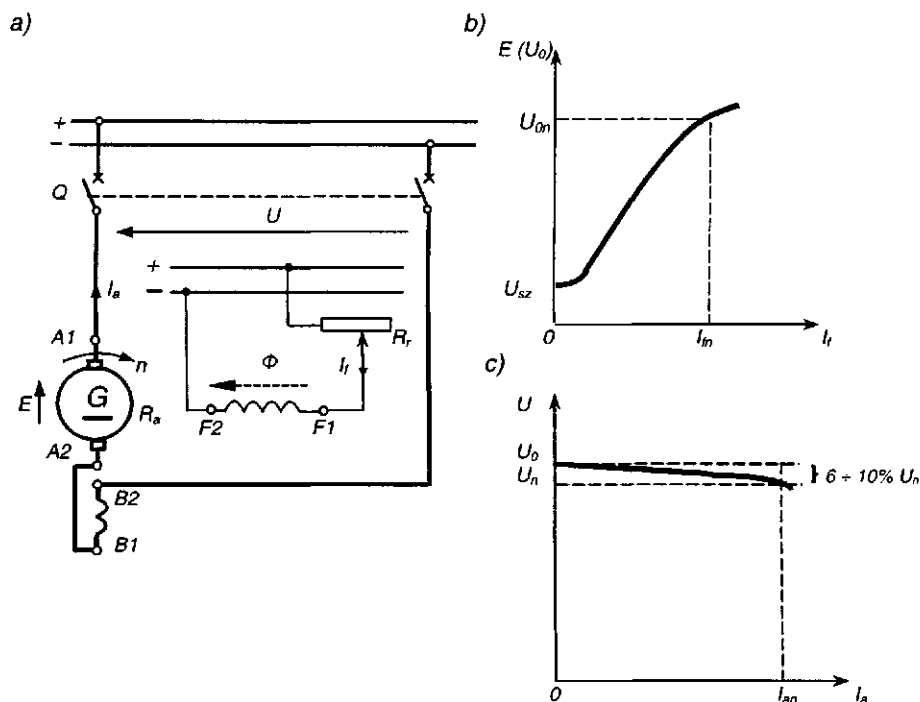
### 6.1.2. Prądnica obcowzbudna

W prądnicy obcowzbudnej uzwojenie wzbudzenia jest zasilane z niezależnego źródła prądu stałego. Pokazano to na rys. 6.7 a. Każda zmiana prądu wzbudzenia // za pomocą rezystora  $R_r$  wywołuje odpowiednio zmianę siły elektromotorycznej  $E$  (rys. 6.7 b), indukowanej w sposób stabilny według krzywej magnesowania. Charakterystyka ta określająca zmiany napięcia  $U_0$  równego SEM  $E$  nieobciążonej prądnicy nazywa się **charakterystyką biegu jałowego**. Napięcie wyjściowe prądnicy jest pomniejszone w stosunku do SEM o spadek napięcia na rezystancji twornika  $R_a$ , czyli:

$$U = E - I_a \cdot R_a \quad (6.6)$$

Przebieg tego napięcia przy wzroście obciążenia przedstawia **charakterystyka zewnętrzna** prądnicy  $U = f(I)$ , pokazana na rys. 6.7 c.

Prądnice obcowzbudne są obecnie wykorzystywane jako źródło napięcia stałego w specjalnych układach napędowych, przy czym ich napędem jest wówczas silnik asynchroniczny zasilany z sieci prądu zmiennego.



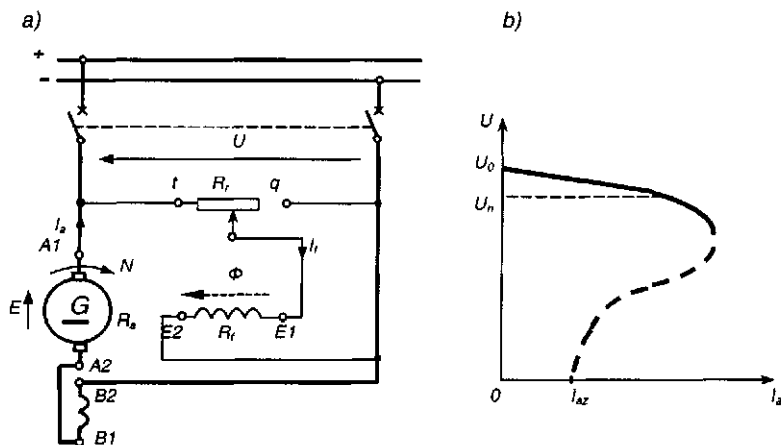
Rys. 6.7. Prądnica obcowzbudna:

a) schemat połączeń; b) charakterystyka biegu jałowego; c) charakterystyka zewnętrzna;  $Q$  - wyłącznik główny prądnicy;  $R_r$  - opornik regulacyjny

### 6.1.3. Prądnica bocznikowa

W prądnicie bocznikowej uzwojenie wzbudzenia jest przyłączone do zacisków twornika - rys. 6.8 a. Strumień magnetyczny, jaki wytwarza to uzwojenie, jest więc zależny od napięcia  $U$  na zaciskach prądnicy. Regulacja napięcia  $U$  jest realizowana przez zmianę rezystancji  $R_r$  w obwodzie wzbudzenia. Zacisk  $q$  rezystora  $R_r$  (zwany zaciskiem przeciwiskrowym) służy do zwierania uzwojenia wzbudzenia przy wyłączaniu prądnicy.

Samowzbudzenie prądnicy bocznikowej polega na tym, że mała SEM szczątkowa  $E_{sz}$  od magnetyzmu szczątkowego powoduje przepływ początkowo niewielkiego prądu wzbudzenia. Strumień magnetyczny, jaki on wytworzy, powiększa strumień całkowity w maszynie, a tym samym indukuje większą SEM, która daje dalszy wzrost prądu wzbudzenia itd. Proces ten został przedstawiony na rys. 6.9.

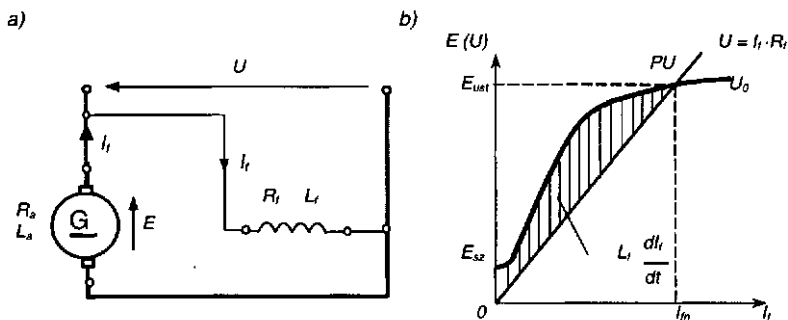


Rys. 6.8. Prądnica bocznikowa:  
 a) schemat połączeń; b) charakterystyka zewnętrzna;  
 $E_{sz}$  - SEM szczątkowa,  $I_K$  - prąd zwarcia

Na rysunku 6.9 a pokazano uproszczony obwód prądnicy bocznikowej. Pomijając małą rezystancję  $R_a$  i indukcję  $L_a$  wirnika (w porównaniu z rezystancją i indukcją  $L_f$  uzwojenia wzbudzenia), możemy dla tego obwodu napisać równanie różniczkowe dla przebiegu samowzbudzenia:

$$E - I_f \cdot R_f = L \frac{dI_f}{dt} \quad (6-7)$$

Prawą stronę tej zależności dla różnych wartości prądu  $I_f$ , pokazano na rys. 6.9 b jako wartości napięcia między charakterystyką biegu jałowego  $E = f(I_f)$  i zależnością prostoliniową  $U = I_f \cdot R_f$  spadku napięcia na uzwojeniu wzbudzenia.



Rys. 6.9. Proces samowzbudzenia prądnicy bocznikowej:  
 a) schemat obwodu wzbudzenia; b) charakterystyki biegu jałowego i spadku napięcia na uzwojeniu wzbudzenia;  $PU$  - punkt pracy ustalonej

W punkcie PU proces samowzbudzenia jest ukończony i siła elektromotoryczna osiąga wartość ustaloną  $E_{ust}$ .

Aby prądnica rozpoczęła proces samowzbudzenia, muszą być spełnione jednocześnie następujące warunki, zwane warunkami samowzbudzenia:

- w obwodzie magnetycznym prądnicy musi istnieć magnetyzm szczątkowy (w przypadku rozmagnesowania należy zasilić wzbudzenie na chwilę z obcego źródła);
- uzwojenie wzbudzenia musi być tak połączone z twornikiem, aby strumień w nim wytworzony wzmacniał magnetyzm szczątkowy, tj. aby SEM wzrastała (o ile tak nie jest należy zmienić kierunek prądu wzbudzenia przez odwrotne połączenie z twornikiem);
- rezystancja obwodu wzbudzenia (czyli wartość  $R_w$ ) powinna być odpowiednio mała tak, aby prosta spadku napięcia w obwodzie wzbudzenia przebiegała poniżej charakterystyki magnesowania prądnicy  $E = f(I_w)$ , tj. charakterystyki biegu jałowego, jak pokazano to na rys. 6.9 b.

W charakterystyce zewnętrznej prądnicy bocznikowej (rys. 6.8 b) występuje większy spadek napięcia przy wzroście obciążenia niż w prądnicy obcowzbudnej. Ponadto przy coraz większym obciążeniu zmniejsza się SEM prądnicy, a tym samym zmniejsza się prąd wzbudzenia, co prowadzi do odmagnesowania maszyny a wartość prądu zwarcia jest podtrzymywana tylko napięciem szczątkowym. Z tego względu prądnice bocznikowe muszą być wyposażone w regulator napięcia, który steruje prądem wzbudzenia prądnicy tak, by napięcie na jej zaciskach miało stałą wartość niezależnie od obciążenia.

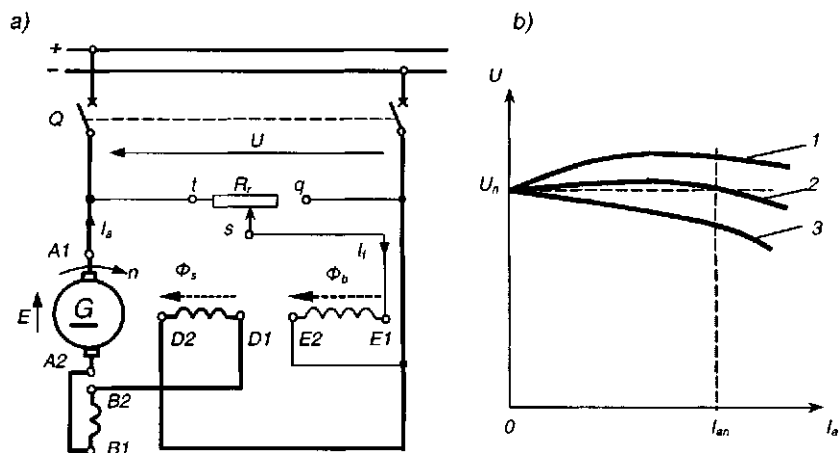
#### 6.1.4. Prądnica szeregowo-bocznikowa

Na statkach zelektryfikowanych prądem stałym jako źródło prądu najczęściej stosowane są prądnice szeregowo-bocznikowe. W prądnicy szeregowo-bocznikowej pracują dwa uzwojenia wzbudzenia - szeregowo oraz bocznikowe. Uzwojenie szeregowe, przez które płynie prąd obciążenia  $I_o$ , wytwarza strumień  $\Phi_o$  o wartości zmieniającej się wraz z obciążeniem prądnicy. Uzwojenie bocznikowe wytwarza natomiast strumień  $\Phi_h$  zależny wyłącznie od napięcia na zaciskach prądnicy. Sposób połączenia uzwojeń pokazano na rys. 6.10 a, a charakterystyki zewnętrzne na rys. 6.10 b.

Strumienie magnetyczne wytwarzane przez oba uzwojenia są skierowane zgodnie. Strumień uzwojenia szeregowego dobiera się jednak tak, aby kompensował całkowity spadek napięcia występujący tylko przy wzbudzeniu bocznikowym. Dzięki temu uzyskuje się charakterystykę zewnętrzną skompensowaną, co oznacza, że napięcie prawie nie zależy od obciążenia i zachowuje dużą stałość w takim stopniu, że na statkach o małym stopniu elektryfikacji nie potrzeb-



ne są nawet regulatory napięcia, bowiem zmiany napięcia nie przekraczają granic ustalonych w przepisach PRS.



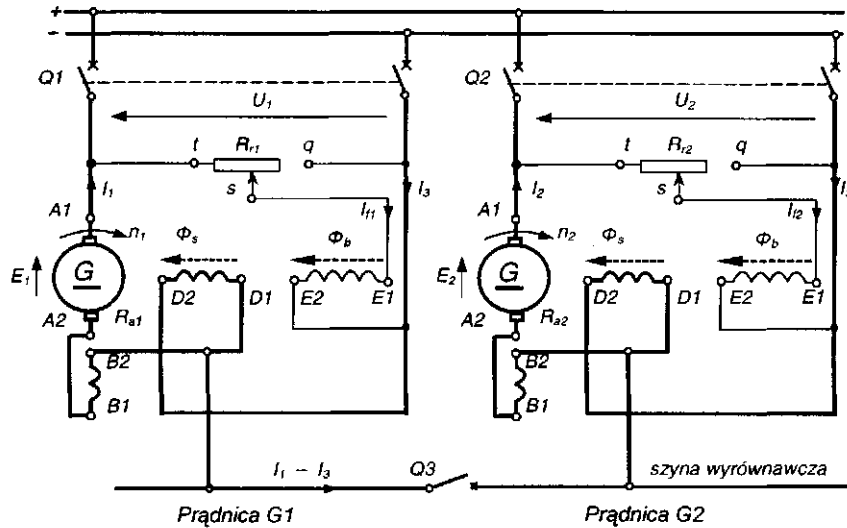
Rys. 6.10. Prądnic szeregowo-bocznikowa:  
 a) schemat połączeń; b) charakterystyki zewnętrzne - przewzbudzona (1),  
 skompensowana (2) i niedowzbudzona (3)

### 6.1.5. Praca równoległa prądnic szeregowo-bocznikowych

W warunkach okrętowych często zachodzi potrzeba pracy równoległej prądnic szeregowo-bocznikowych i dlatego zagadnienie to wymaga bliższego omówienia. Elementem charakterystycznym takiej pracy, w odróżnieniu od prądnic bocznikowych, jest konieczność wprowadzenia trzeciej szyny zwanej wyrównawczą w celu uzyskania równomiernego rozkładu obciążenia. Układ połączeń prądnic pokazano na rys. 6.11. Przy włączaniu prądnicy do pracy równoległej z drugą prądnicą powinny być spełnione następujące podstawowe warunki:

- 1) biegunowość obu prądnic na zaciskach musi być zgodna,
- 2) napięcia na zaciskach obu prądnic muszą być równe sobie ( $U_1 = U_2$ ).

Warunek pierwszy sprawdza się za pomocą woltomierzy. Jest on spełniony, gdy wychylenia ich są zgodne. Warunek drugi jest spełniony natomiast wtedy, kiedy wskazania woltomierzy są jednakowe. Napięcie prądnicy włączanej do pracy równoległej, np. G2, reguluje się przez zmiany prądu wzbudzenia  $I_f$  za pomocą rezystora  $R_{f2}$ .



Rys. 6.11. Schemat połączeń prądnic szeregowo-bocznikowych do pracy równoległej

Jeżeli porównamy równania napięć dwóch prądnic, to otrzymamy:

$$U_1 = E_1 - I_1 \cdot R_{a1} \quad U_2 = E_2 - I_2 \cdot R_{a2}$$

Jeśli przy pracy równoległej jest spełnione:  $U_1 = U_2$  i  $E_1 = E_2$  to:

$$I_1 \cdot R_{a1} = I_2 \cdot R_{a2}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_{a2}}{R_{a1}} \quad (6.8)$$

Jest to warunek konstrukcyjny prądnic, które będą pracowały równoległe, przy proporcjonalnym rozkładzie obciążenia na poszczególne prądnice.

Jak wspomniano wcześniej, SEM prądnicy zależy od prędkości obrotowej  $n$  silnika napędowego prądnicy. Przy (wahaniach) wzroście obrotów silnika napędowego będzie również zwiększała się SEM, a co zatem idzie i natężenie prądu obciążenia, zwiększając strumień magnesujący pochodzący od uzwojenia szeregowego. Zjawisko to może doprowadzić do dużej dysproporcji obciążenia prądnic. Takiemu zjawisku przeciwdziałamy łącząc równoległe szeregowo uzwojenia wzbudzenia. Na podstawie I prawa Kirchhoffa zwiększony prąd obciążenia prądnicy podzieli się proporcjonalnie na dwa uzwojenia szeregowo, a tym samym SEM obu prądnic będzie zmieniała się proporcjonalnie w obu prądnicach.

Postępowanie przy załączeniu prądnicy  $G2$  do pracy równoległej z  $G1$  należy rozpocząć od zamknięcia wyłącznika  $Q3$ , czyli załączenia szyny wyrównawczej łączącej równolegle uzwojenia szeregowo. Warunku pierwszego nie sprawdza się na statku, bowiem jest on ustalony w trakcie instalowania prądnic. Następnie wyrównuje się napięcia za pomocą rezystora obwodu wzbudzenia  $R_{r2}$  i załącza prądnicę  $G2$  do sieci, zamykając wyłącznik  $Q2$ .

Załączona prądnica początkowo biegnie jałowo i przejmuje obciążenie dopiero po zwiększeniu prądu wzbudzenia  $I/2$ .

## 6.2. Silniki elektryczne prądu stałego

### 6.2.1. Zasada działania silnika prądu stałego

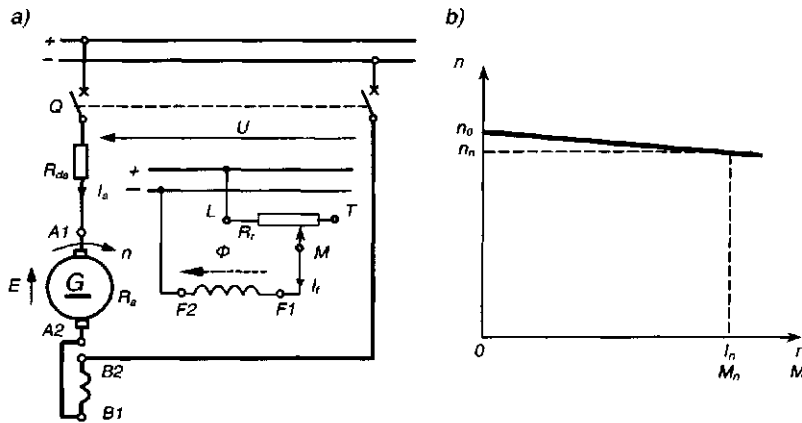
Budowa silników elektrycznych prądu stałego jest podobna jak prądnic. Zasada działania oparta jest na zasadzie działania siły na przewód z prądem w polu magnetycznym (patrz rozdz. 2.1). Jeżeli więc do zacisków maszyny prądu stałego przyłożymy napięcie stałe, to uzwojenie magnesujące wytworzy strumień magnetyczny  $\langle 2 \rangle$ , a prąd płynący przez uzwojenie wirnika (twornika)  $I_a$  spowoduje, że na pręty uzwojenia będzie działała siła  $F$ . Kierunek tej siły możemy określić na **zasadzie reguły lewej ręki**. W silniku wytworzy się moment obrotowy  $M$ , którego wielkość określa wzór:

$$M = c_m \cdot \Phi \cdot I_a \quad (6.9)$$

gdzie  $c_t$  - stała konstrukcyjna mechaniczna maszyny.

Jeżeli utrzymamy niezmienną biegunowość napięcia prądnicy i silnika to zauważymy, że prąd silnika będzie przeciwny do prądu w stanie, gdy maszyna pracowała jako prądnica (a więc płynie przeciw sile elektromotorycznej maszyny). Rozpatrując oddziaływanie twornika na podstawie rys. 6.4, stwierdzimy, że strefa neutralna ma tendencję do przesunięcia się **w kierunku przeciwnym do obrotów wirnika**.

Układy połączeń silników elektrycznych prądu stałego oraz oznaczenia zacisków są identyczne jak prądnic (rys. 6.7 do 6.11). Rozróżniamy silniki obco-wzbudne, bocznikowe, szeregowo-bocznikowe oraz szeregowo.



Rys. 6.12. Silnik obcowzbudny: a) schemat połączeń; b) charakterystyka mechaniczna;  
 $R_r$  - rezystor regulacyjny prądu wzbudzenia,  $R_{da}$  - rezystor dodatkowy w obwodzie twornika

W silniku obcowzbudnym (rys. 6.12) równanie napięć obwodu głównego w stanie ustalonym wynosi:

$$U = E + I_a \cdot (R_a + R_{da}) \quad (6.10)$$

gdzie:

$E$  - siła elektromotoryczna wytworzona w uzwojeniu wirnika

$$E = c_e \cdot \Phi \cdot n,$$

$c_e$  — stała konstrukcyjna elektryczna maszyny,

$I_a$  - prąd płynący w uzwojeniu twornika (wirnika),

$R_a$  - rezystancja twornika,

$R_{da}$  - rezystancja dodatkowa obwodu twornika.

Podstawiając wartość  $E$  do równania napięć otrzymamy:

$$U = c_e \cdot \Phi \cdot n + I_a \cdot (R_a + R_{da})$$

stąd:

$$n = \frac{U}{c_e \cdot \Phi} - \frac{R_a + R_{da}}{c_e \cdot \Phi} I \quad (6.11)$$

Jeżeli we wzorze (6.11) prąd twornika  $I_a$  wyrazimy na podstawie wzoru (6.9) przez moment  $M$  otrzymamy wyrażenie:

$$n = \frac{U}{c_e \cdot \Phi} - \frac{R_a + R_{da}}{c_e \cdot c_m \cdot \Phi^2} M \quad (6.12)$$

Wyrażenia (6.11 i 6.12) są matematyczną postacią **charakterystyki mechanicznej silnika**  $n = f(M)$  lub  $n = f(i_a)$ . Przedstawiono ją na rys. 6.12 b.

W stanie **biegu jałowego** silnika ( $M = 0$ ) na podstawie wzoru (6.12) otrzymujemy wzór na **prędkość biegu jałowego silnika**  $n_0$ :

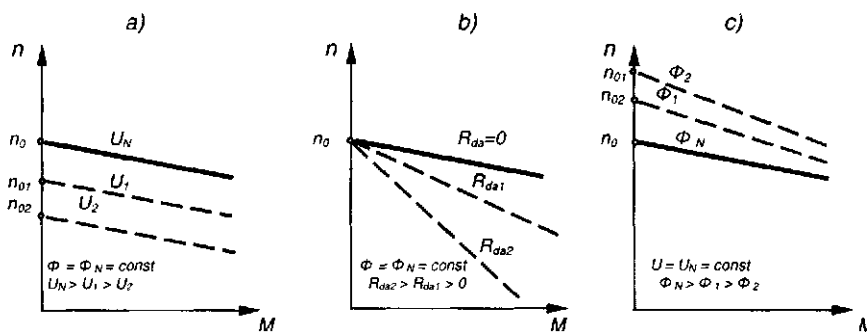
$$n_0 = \frac{U}{c_e \cdot \Phi} \quad (6.13)$$

**Charakterystyka mechaniczna naturalna** silnika jest to charakterystyka silnika pracującego przy parametrach znamionowych ( $U = U_N$ ,  $\Phi = \Phi_N$ ,  $i_a = 0$ ).

**Regulacja prędkości obrotowej silników obcowzbudnych prądu stałego** może odbywać się trzema sposobami (co wynika z powyższych wzorów):

- 1) zmianą napięcia  $U$  (rys. 6.13 a);
- 2) zmianą rezystancji obwodu twornika, tj. zmianą rezystancji dodatkowej  $R_{da}$  włączonej w obwód twornika (rys. 6.13 b);
- 3) zmianą prądu wzbudzenia // a tym samym zmianą strumienia  $\Phi$  (rys. 6.13 c).

Charakterystyki uzyskane w ten sposób noszą nazwę **charakterystyk sztucznych**.



Rys. 6.13. Regulacja obrotów silnika prądu stałego:  
 a) zmiana napięcia; b) zmiana rezystancji w obwodzie twornika;  
 c) zmiana strumienia wzbudzenia

Silniki bocznikowe oraz szeregowo-bocznikowe mają charakterystyki mechaniczne zbliżone do charakterystyki silnika obcowzbudnego, takie same też są sposoby regulacji prędkości.

### 6.2.2. Rozruch silników prądu stałego

W chwili włączenia silnika do sieci jego prędkość  $n = 0$ , zatem i siła elektromotoryczna wytwarzana w wirniku  $E = 0$ . Prąd rozruchowy  $I_r$ , pobierany wówczas przez silnik zgodnie ze wzorem (6.10) wynosi:

$$I_r = \frac{U}{R_a + R_{da}}$$

Prąd rozruchowy  $I_r$  w maszynach prądu stałego, przy włączeniu bezpośrednim na napięcie znamionowe może osiągnąć wartość  $I_r = (10 \text{--} 20) I_n$ , dlatego też powinien być ograniczony do wartości dopuszczalnej dla silnika i sieci zasilającej.

Rozruch silników prądu stałego musi odbywać się w taki sposób, aby uzyskać odpowiednią wartość momentu rozruchowego i umożliwić osiągnięcie potrzebnej prędkości obrotowej. Możliwe są trzy sposoby rozruchu:

- rozruch bezpośredni,
- rozruch przy obniżonym napięciu zasilania,
- rozruch za pomocą rezystancji włączonych w obwód twornika.

**Rozruch bezpośredni** możliwy jest tylko dla maszyn bardzo małych mocy, w których rezystancja uzwojeń wirnika jest stosunkowo duża, a mały moment bezwładności powoduje, że czas rozruchu jest krótki.

**Rozruch przy obniżonym napięciu** jest korzystny ze względu na możliwość dowolnego ograniczenia prądu rozruchowego i minimalnych stratach układu regulacji. Wymaga to jednak zainstalowania dodatkowych układów regulacji napięcia. Sposób ten jest stosowany tylko w napędach specjalnych.

**Rozruch za pomocą rezystancji włączonych w obwód wirnika.** Jest to najbardziej rozpowszechniony i prosty układ rozruchowy silników prądu stałego. Tym sposobem można uzyskać praktycznie dowolną ilość stopni rozruchowych, co wiąże się z odpowiednim ograniczeniem prądu rozruchowego. Straty energii powstałe na rezystancji rozruchowej są pomijalne ze względu na krótki czas rozruchu.

### 6.2.3. Hamowanie silników prądu stałego

W układach napędowych, składających się z silnika elektrycznego i maszyny napędzanej potrzeba hamowania zachodzi w następujących okolicznościach:

- trzeba zatrzymać układ napędowy będący w ruchu;
- trzeba zmniejszyć prędkość obrotową układu;
- trzeba utrzymać stałą prędkość obrotową układu, jeżeli maszyna napędzana staje się źródłem energii i wymusza zwiększenie prędkości układu napędowego (np. w układach dźwignicowych w czasie opuszczania ciężaru).

**Hamowanie naturalne** realizowane przez odłączenie zasilania silnika jest najprostszym sposobem zatrzymania układu - wówczas układ po pewnym czasie (zwanym **czasem wybiegu**) zatrzyma się na skutek zamiany energii kinetycznej układu na ciepło, wywołane tarciami w częściach ruchomych i ewentualnie na pracę wykonaną przez maszynę napędzaną.

**Hamowanie mechaniczne** polega na stosowaniu różnego rodzaju hamulców mechanicznych, np. ciernych, uruchamianych elektromagnesami. Elektromagnes hamulca, załączany jednocześnie z silnikiem, powoduje zwolnienie hamulca. Wyłączenie elektromagnesu powoduje, że sprężyny zwrotne hamulca zaciskają elementy hamujące na części ruchomej układu.

**Hamowanie elektryczne jest** to stan pracy silnika, w którym pracując jako hamulec wytwarza on moment obrotowy skierowany przeciwnie do kierunku wirowania wirnika. Rozróżnia się trzy rodzaje hamowania elektrycznego:

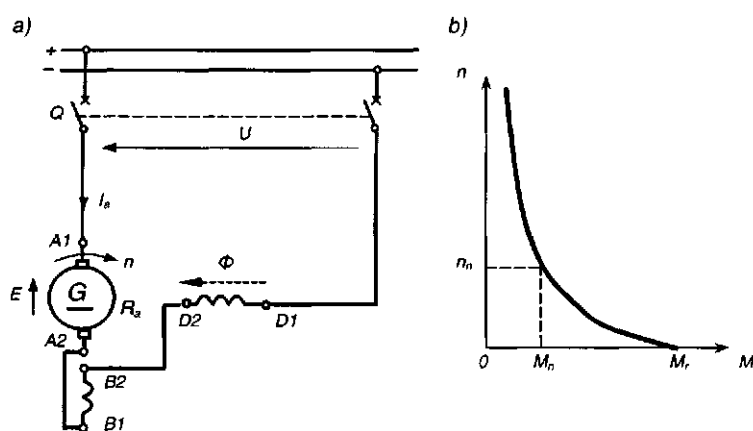
- 1. Hamowanie prądnicowe jest** możliwe tylko w układzie, którego prędkość jest większa od prędkości biegu jałowego silnika  $n_0$ . W takim przypadku siła elektromotoryczna  $E$  indukowana w tworniku staje się większa od napięcia zasilania  $U$ , w tworniku popłynie prąd w kierunku przeciwnym niż przy pracy silnikowej i silnik staje się prądnicą napędzaną energią kinetyczną układu. Ponieważ energia elektryczna wytwarzana w maszynie zostaje oddawana do sieci, ten rodzaj hamowania nazywa się też **hamowaniem odzyskowym**. Hamowanie prądnicowe występuje samoczynnie wówczas, gdy prędkość układu wzrośnie powyżej  $HQ$  wskutek działania przyczyn zewnętrznych i trwa do chwili zrównania się prędkości układu z prędkością biegu jałowego. Hamowanie prądnicowe można też wywoływać sztucznie obniżając napięcie zasilania, gdyż nowa prędkość biegu jałowego  $n_0'$  jest niższa od prędkości rozpędzonego układu. Przy płynnym obniżaniu napięcia zasilającego do zera,

układ będzie cały czas hamował w sposób prądnicowy, w przypadku spadku prędkości w pobliże zera włączają się hamulce mechaniczne.

2. **Hamowanie przeciwrzędem** polega na zmianie biegunowości napięcia zasilającego. W ten sposób silnik wytwarza moment napędowy również w kierunku przeciwnym do obrotów układu. Ponieważ prąd pobierany przez silnik gwałtownie rośnie, ogranicza się go przez włączanie w szereg z wirnikiem rezystorów (można do tego celu wykorzystać rezystory rozrusznika). Po osiągnięciu prędkości wartości bliskich zero, zasilanie silnika należy wyłączyć i wyhamować układ mechanicznie, gdyż inaczej rozpocznie on rozruch w kierunku przeciwnym.
3. **Hamowanie dynamiczne** polega na przełączeniu zacisków zasilania twornika silnika ze źródła napięcia na dodatkowy rezystor. Silnik staje się wtedy prądnicą obcowzbudną napędzaną energią układu i pracującą na wspomniany rezystor. Hamowanie dynamiczne jest mało skuteczne przy małych prędkościach i podobnie jak w poprzednich metodach proces hamowania należy kończyć za pomocą hamulców mechanicznych.

#### 6.2.4. Silnik szeregowy prądu stałego

W silniku szeregowym uzwojenie wzbudzenia jest włączone w szereg z twornikiem, a tym samym prąd obciążenia  $I_a$  jest jednocześnie prądem wzbudzenia (rys. 6.14 a).



Rys. 6.14. Silnik szeregowy: a) schemat połączeń; b) charakterystyka mechaniczna;  $M_r$  - moment rozruchowy silnika



Ponieważ w silniku szeregowym strumień wzbudzenia ( $\Phi$  jest równy:

$$\Phi = k \cdot I_a \quad (6.14) \text{ moment obrotowy silnika będzie}$$

wynosił:

$$M = c_m \cdot k \cdot I_a^2 = c_1 \cdot I_a^2 \quad \text{lub} \quad M = c_2 \cdot \Phi^2 \quad (6.15)$$

a wzór (6.12) przybierze dla tego silnika postać (nie uwzględniając rezystancji obwodu twornika):

$$n = c_3 \frac{U}{\sqrt{M}} \quad (6.16)$$

gdzie  $c_1, c_2, c_3$  - stałe.

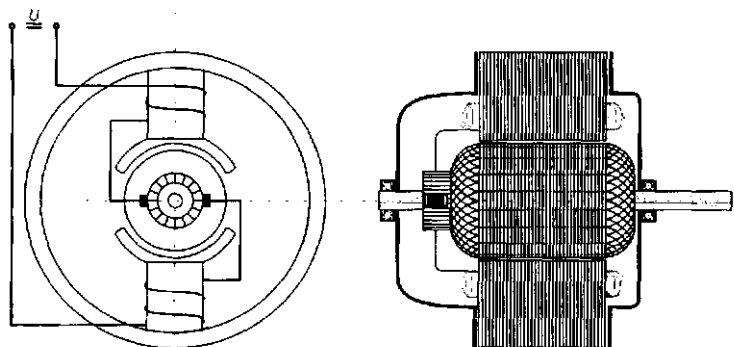
Charakterystyka mechaniczna silnika szeregowego została przedstawiona na rys. 6.14 b. Jak wynika z wykresu prędkość silnika jest bardzo uzależniona od obciążenia, a brak obciążenia może doprowadzić do gwałtownego wzrostu prędkości („rozbiegania się”) grożącego uszkodzeniem silnika. Dlatego silniki te mogą być stosowane tylko w tych układach napędowych, w których mogą być trwale sprzężone z urządzeniem napędzanym.

Zastosowanie silników szeregowych prądu stałego jest w zasadzie ograniczone do napędu pojazdów (np. trakcja elektryczna, wózki akumulatorowe).

Regulacja prędkości obrotowej silnika odbywa się najczęściej przez zmianę napięcia zasilania. Współczesne napędy trakcyjne z silnikami szeregowymi są zasilane i regulowane przez sterowniki prądu stałego - przerywacze (patrz rozdz. 5.3).

### 6.2.5. Silniki uniwersalne

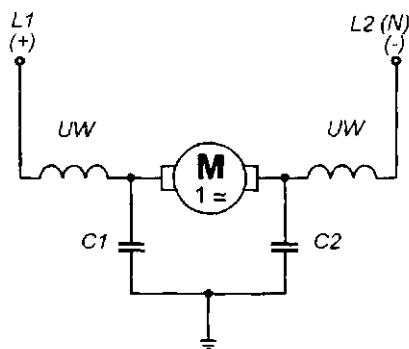
Silnikiem uniwersalnym nazywa się silnik szeregowy komutatorowy, który może być zasilany zarówno prądem stałym, jak i przemiennym jednofazowym. Silnik ten jest zbudowany podobnie do silnika szeregowego prądu stałego, ale w odróżnieniu od niego rdzeń stojana jest wykonany z pakietów blach (dla zmniejszenia strat na prądy wirowe, przy zasilaniu prądem przemiennym). Schemat połączeń i szkic konstrukcji silnika pokazano na rys. 6.15 i 6.16. Z reguły uzwojenie szeregowe buduje się jako dzielone na dwie części i połączone jąkną rys.6.16.



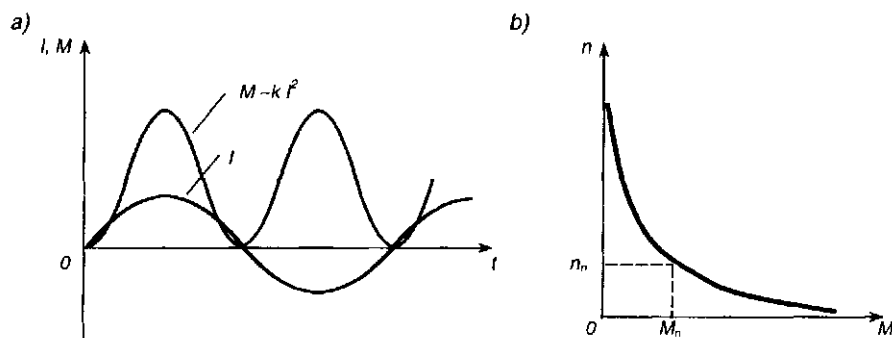
Rys. 6.15. S/kic konstrukcji silnika uniwersalnego

W silniku szeregowym prądu stałego moment obrotowy jest proporcjonalny do kwadratu prądu, bowiem ten sam prąd płynie przez uzwojenie twornika i uzwojenie szeregowo ( $M \sim k \cdot I^2$ ). Przy zasilaniu prądem przemiennym, kiedy zwroty prądów w obu uzwojeniach ulegną zmianie, to w iloczynie moment obrotowy zachowa ten sam znak dodatni i silnik będzie się obracał tak samo, jak przy prądzie stałym. Oznacza to, że zmiana biegunowości napięcia nie wpływa na zmianę kierunku wirowania. Jest to jeden z nielicznych silników elektrycznych, dla którego rodzaj prądu i biegunowości nie ma znaczenia.

Przy prądzie przemiennym moment obrotowy ma przebieg pulsujący, lecz częstotliwość tych pulsacji jest podwójna w stosunku do częstotliwości napięcia sieci, co nie jest odczuwalne przy pracy silnika. Charakterystyka mechaniczna silnika dla obu rodzajów prądów jest zbliżona i odpowiada „miękkiej” charakterystyce silnika szeregowego. Przebieg pulsacji momentu przy prądzie przemiennym i charakterystykę mechaniczną silnika uniwersalnego pokazano na rys. 6.17.



Rys. 6.16. Silnik uniwersalny z filtrem przeciwzakłóceń: UW - szeregowo uzwojenie wzbudzenia; C1, C2 — kondensatory filtrujące



Rys. 6.17. Przebieg pulsacji momentu obrotowego silnika uniwersalnego przy zasilaniu prądem przemiennym (a) oraz charakterystyka mechaniczna (b)

Silniki uniwersalne mają ustalony kierunek wirowania niezależny od rodzaju i biegunowości zasilania. Zmiana kierunku wirowania silnika jest możliwa jedynie przez odwrotne przełączenie uzwojenia wirnika w stosunku do uzwojenia wzbudzenia.

Silniki uniwersalne buduje się na prędkości do kilkunastu tysięcy obrotów na minutę. Są one stosowane tam, gdzie takie prędkości są niezbędne, jak np. w wiertarkach ręcznych, odkurzaczach, czy w młynkach do kawy.

Obecność komutatora w silniku uniwersalnym, przy tak dużych prędkościach, wywołuje iskrzenia pod szczotkami, co jest powodem powstawania zakłóceń radioelektrycznych. Oznacza to, że takie silniki generują zakłócenia wpływające na pogorszenie odbioru przez urządzenia radiowe i telewizyjne. W celu ograniczenia tych zakłóceń konieczne jest stosowanie **filtrów przeciwzakłóceńowych**. Są to kondensatory, których jedna okładzina jest połączona ze szczotkami, a druga - uziemiona (rys. 6.16). Prądy wysokiej częstotliwości wywołane iskrzeniem są zwierane przez reaktancję kondensatorów, a ich uziemienie powoduje wyrównanie potencjałów obu szczotek względem ziemi. Ponieważ są one przeciwnego znaku, to pola wytworzone przez te prądy kompensują się wzajemnie.

### 6.3. Straty, sprawność i nagrzewanie się maszyn elektrycznych

Procesowi przemiany energii elektrycznej w maszynach elektrycznych towarzyszą straty energii. Do podstawowych strat w maszynie (dotyczy to również transformatorów) zaliczamy straty w żelazie i miedzi.

**Straty w żelazie**  $P_{Fe}$  wywoływane są przez dwa zjawiska: przemagnesowywanie ferromagnetycznego rdzenia maszyny w czasie jej obrotu (tzw. **straty na histerezę**) oraz przez przepływ prądów wirowych w rdzeniu znajdującym się w zmiennym polu magnetycznym (tzw. **straty na prądy wirowe**). Straty w że-

łazie zależne są od indukcji  $B$  w żelazie maszyny oraz częstotliwości/ zmian pola. W przybliżeniu można je określić wzorem:

$$P_{Fe} = k \cdot B^2 \cdot f^{1,3} \quad (6.17) \text{ gdzie } c - \text{stała. Straty w}$$

żelazie stanowią około 1 do 1,5% mocy znamionowej maszyny  $-P_{,,}$ .

**Straty w miedzi**  $P_{Cu}$  powstają w uzwojeniach maszyny o rezystancji  $R$ , przez które przepływa prąd elektryczny  $I$  i określane są wzorem:

$$P_{Cu} = I^2 \cdot R \quad (6.18)$$

Straty w miedzi wynoszą zazwyczaj 4 do 10%  $P_n$ .

Oprócz strat podstawowych w maszynach występują jeszcze m.in.:

- straty wzbudzenia  $P_f$  - straty w miedzi uzwojenia wzbudzenia maszyny; wynoszą od 1 do 5%  $P_{,,}$ ;
- straty mechaniczne  $P_m$  — związane z tarciem w łożyskach oraz komutatora i szczotek w maszynach komutatorowych, wynoszą ułamek procenta  $P_n$ ;
- straty wentylacyjne  $P_{went}$  - moc potrzebna do napędu wentylatora chłodzącego, osadzonego na wale maszyny (ułamek procenta  $P_{,,}$ ).

Całkowite straty mocy w maszynie  $P_t$  wynoszą:

$$P_t = P_{Fe} + P_{Cu} + P_f + P_m + P_{went} \quad (6.19)$$

Sprawność maszyny  $T_j$  określamy wzorami:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad \text{lub} \quad \eta = \frac{P_1 - P_t}{P_1} \quad \text{lub} \quad \eta = \frac{P_2}{P_2 + P_t} \quad (6.20)$$

gdzie:

- $P_1$  - moc pobierana przez maszynę,  $P_2$
- moc oddawana przez maszynę.

Mocą znamionową maszyny jest zawsze moc oddawana  $P_2$ . W przypadku silników będzie to moc na wale maszyny a w prądnicach - moc oddawana do odbiornika.

Pod wpływem strat powstających podczas pracy maszyny nagrzewa się żelazo czynne i uzwojenia maszyny oraz inne jej elementy. Najwrażliwsza na nagrzewanie jest izolacja uzwojeń i najczęściej przy przeciążeniu maszyny ule-

ga ona uszkodzeniu. Temperatura maszyny rośnie po włączeniu aż do osiągnięcia przez maszynę temperatury ustalonej, odpowiadającej stanowi równowagi cieplnej, gdy cała ilość ciepła wytwarzanego przez maszynę będzie oddawana do otoczenia. Przyrost temperatury maszyny  $\Delta T$  określa wzór:

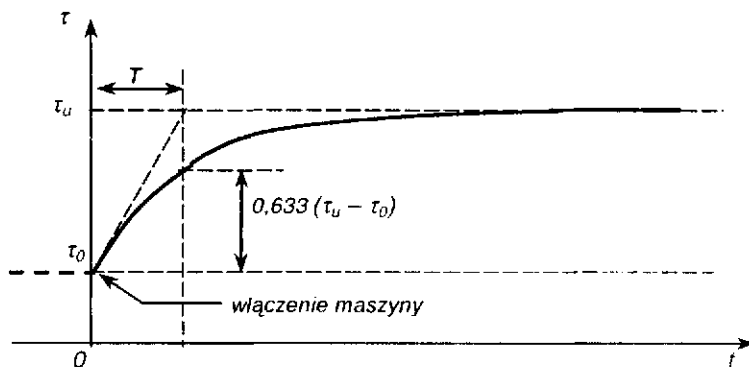
$$\Delta T = T - T_0 = T_u \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (6.21)$$

gdzie:

$T_0$  - temperatura początkowa (otoczenia),  $T_u$  - temperatura ustalona,

$T$  - stała czasowa nagrzewania maszyny zależna od masy maszyny oraz jej ciepła właściwego i powierzchni chłodzenia.

Przykładowy przebieg nagrzewania się maszyny jest przedstawiony na rys. 6.18. Po upływie czasu równego stałej czasowej  $T$  maszyna osiągnie ok. 63% temperatury ustalonej.



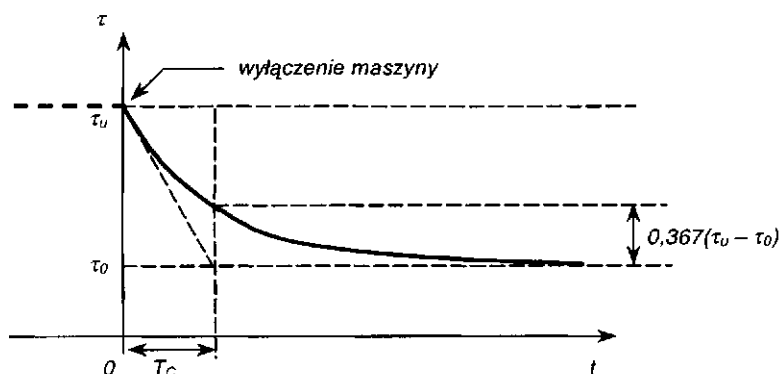
Rys. 6.18. Krzywa nagrzewania się maszyny:  $t_0$  - temperatura otoczenia,  $T_u$  - temperatura ustalona,  $T$  - stałą czasowa nagrzewania

W czasie stygnięcia zatrzymanej maszyny, ciepło gromadzone w maszynach nie zostaje wypromieniane na zewnątrz. Przebieg chłodzenia, kuśr ilusinn rys. 6.19, opisany jest wzorem:

$$T = T_0 + (T_u - T_0) e^{-\frac{t}{T_c}} \quad \text{«f-}$$

gdzie  $T_c$  - stała czasowa chłodzenia maszyny.

Stała czasowa chłodzenia maszyny jest większa o ok. 50% od stałej czasowej nagrzewania, gdyż w czasie postoju nie pracuje wentylator maszyny.



Rys. 6.19. Krzywa stygnięcia maszyny:  $T_1$  - temperatura pracy,  $T_0$  - temperatura otoczenia,  $\tau$  - stała czasowa chłodzenia

Ze względu na sposób chłodzenia maszyny elektryczne dzielą się na:

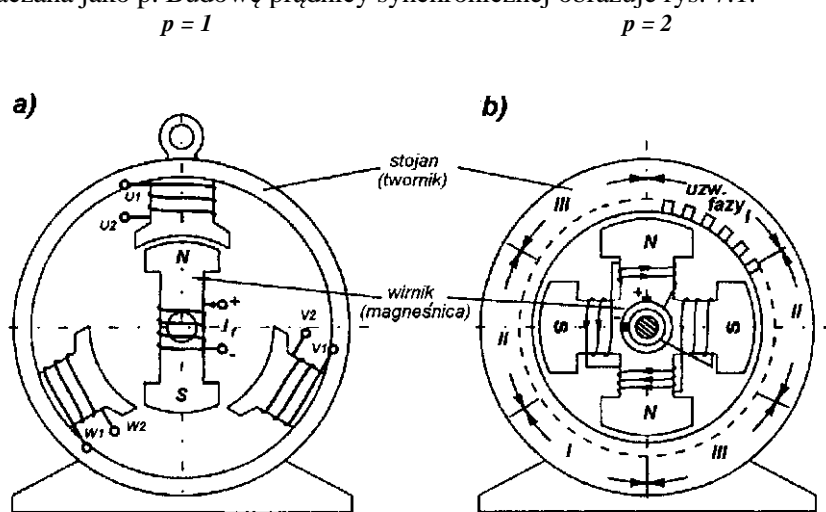
- **maszyny z chłodzeniem naturalnym** - chłodzone tylko naturalnym ruchem powietrza;
- **maszyny z chłodzeniem własnym** - w których chłodzenie własne jest uzupełniane działaniem wewnętrznego wentylatora, umocowanego na wirniku maszyny;
- **maszyny z chłodzeniem zewnętrznym** - są maszynami o zamkniętym wnętrzu; ożebrowana powierzchnia zewnętrzna jest chłodzona wentylatorem osadzonym na wale (i okrytym osłoną z blachy) na zewnątrz maszyny;
- **maszyny o chłodzeniu obcym** - są chłodzone powietrzem dostarczonym do nich przez wentylator pracujący niezależnie od pracy maszyny; w wykonaniach okrętowych wentylator ten najczęściej jest osadzony w podstawie maszyny.

## 7. Prądnice synchroniczne

### 7.1. Zasada budowy i działania prądnicy synchronicznej

Prądnica synchroniczna jest współcześnie najważniejszym źródłem energii elektrycznej prądu trójfazowego w przemyśle oraz na statkach.

Stojan i wirnik prądnicy synchronicznej wykonane są z materiału ferromagnetycznego o dobrej przewodności magnetycznej. W żłobkach stojana umieszczone są uzwojenia trzech faz (I, II, III), których początki mają oznaczenie f/1, V1, W1, a końce odpowiednio f/2, V2, W2. Uzwojenia te można łączyć w gwiazdę lub trójkąt. Wirnik ma bieguny, na których nawinięte jest uzwojenie wzbudzenia zasilania prądem stałym //poprzez dwa zestyki ślizgowe pierścieni -szczotka. Jest to więc elektromagnes (magneśnica) wytwarzający pole magnetyczne o strumieniu  $\Phi$  i stałym kierunku względem wirnika. Ilość par biegunów jest oznaczana jako  $p$ . Budowę prądnicy synchronicznej obrazuje rys. 7.1.



Rys. 7.1. Budowa prądnicy 3-fazowej prądu przemiennego z magneśnicą liczbie par biegunów  $p = 1$  (a) i  $p = 2$  (b)

Wirnik prądnicy napędzany jest za pomocą silnika spalinowego lub turbiny. Gdy wirnik prądnicy obraca się, to pole magnetyczne wytwarzane przez uzwojenie wzbudzenia wiruje również, powstaje zatem pole wirujące.

Ponieważ prędkość obrotowa wymusza częstotliwość/ napięcia wytwarzanego przez prądnicę, prędkość napędu prądnicy powinna wynosić:

$$n = \frac{60 f}{p} [\text{min}^{-1}] \quad (7.1)$$

gdzie  $p$  - ilość par biegunów uzwojenia wzbudzenia.

Wirujące pole magnetyczne indukuje w uzwojeniach stojana siłę elektromotoryczną  $E$ , której wartość chwilowa wynosi:

$$e = E_m \sin \omega t \quad (7.2) \text{ gdzie } \omega = 2 \pi f$$

Podobnie jak w prądnicach prądu stałego, wielkość siły elektromotorycznej  $E$  jest zależna od strumienia wzbudzenia oraz prędkości wirnika  $n$ :

$$E = c_e \Phi n \quad (7.3)$$

Siła elektromotoryczna  $E$  prądnicy obciążonej jest najczęściej mniejsza niż w prądnicy nieobciążonej skutkiem rozmagnesowującego oddziaływania prądu twornika (przy rzadko występującym obciążeniu pojemnościowym - jest odwrotnie).

Napięcie na zaciskach jednej fazy prądnicy obciążonej jest mniejsze od  $E$  o spadki napięcia na impedancji wewnętrznej prądnicy i wynosi:

$$u = U_m \sin \omega t \quad (7.4)$$

Poszczególne napięcia fazowe są przesunięte względem siebie o kąt fazowy  $2\pi/3$ .

Częstotliwość napięcia i prądu wytwarzanego w prądnicy można określić ze wzoru (7.1) na prędkość obrotową. Na podstawie tego wzoru:

$$f = \frac{p \cdot n}{60} \quad (7.5)$$

Można też określić liczbę par biegunów, jaką musi mieć prądnicą, aby wytwarzać napięcie o częstotliwości  $f = 50$  Hz w odniesieniu do konkretnego silnika napędowego. Jeżeli będzie to silnik polskiej produkcji typu A25 o prędkości  $n = 750$  obr/min, to:



$$p = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{750} = 4$$

Przy obciążeniu indukcyjnym prądnicy ( $\cos(p \sim 0_L)$ ) pole magnetyczne wytwarzane przez prąd twornika zmniejsza wypadkowy strumień wzbudzenia maszyny, natomiast przy obciążeniu pojemnościowym ( $\cos \varphi \sim 0_C$ ) pole twornika zwiększa strumień wzbudzenia. Jest to tzw. **oddziaływanie podłużne twornika**. Przy obciążeniu rezystancyjnym pole twornika jest skierowane między bieguny wirnika (**oddziaływanie poprzeczne twornika**) i słabo oddziałuje na pole wypadkowe. Te zjawiska decydują o kształcie charakterystyk zewnętrznych prądnicy.

Do najważniejszych charakterystyk określających pracę prądnicy synchronicznej należą:

- **charakterystyka biegu jałowego** zwana też charakterystyką magnesowania (rys. 7.2 a):

$$U = f(I_f) \text{ (przy } I = 0 \text{ i } f = \text{const})$$

Charakterystyka biegu jałowego z reguły zaczyna się od niewielkiego napięcia szczytkowego ( $V_{sz} = 10$  - r 15 V), umożliwiającego samowzbudzenie prądnicy;

- **charakterystyka zewnętrzna** (rys. 7.2 b):

$$U = f(I) \text{ (przy } I_f = \text{const}, f = \text{const i } \cos \varphi = \text{const})$$

Charakterystyka zewnętrzna jest zależna od współczynnika obciążenia  $\cos \varphi$ . Przy rezystancyjnym charakterze obciążenia ( $\cos \varphi < 1$ ) obciążenie prądem znamionowym (I<sub>n</sub>) powoduje spadek napięcia około 10 - 15%  $f_0$ . Przy obciążeniu indukcyjno-czynnym spadek ten może już sięgnąć wielkości 20 - 60%  $U_0$ . W rezultacie prądnica synchroniczna nie może pracować bez szybkiego regulatora napięcia sterującego prądem wzbudzenia;

- **charakterystyka regulacyjna** (rys. 7.2 c):

$$I_f = f(I) \text{ (przy } U = \text{const}, f = \text{const i } \cos \varphi = \text{const})$$

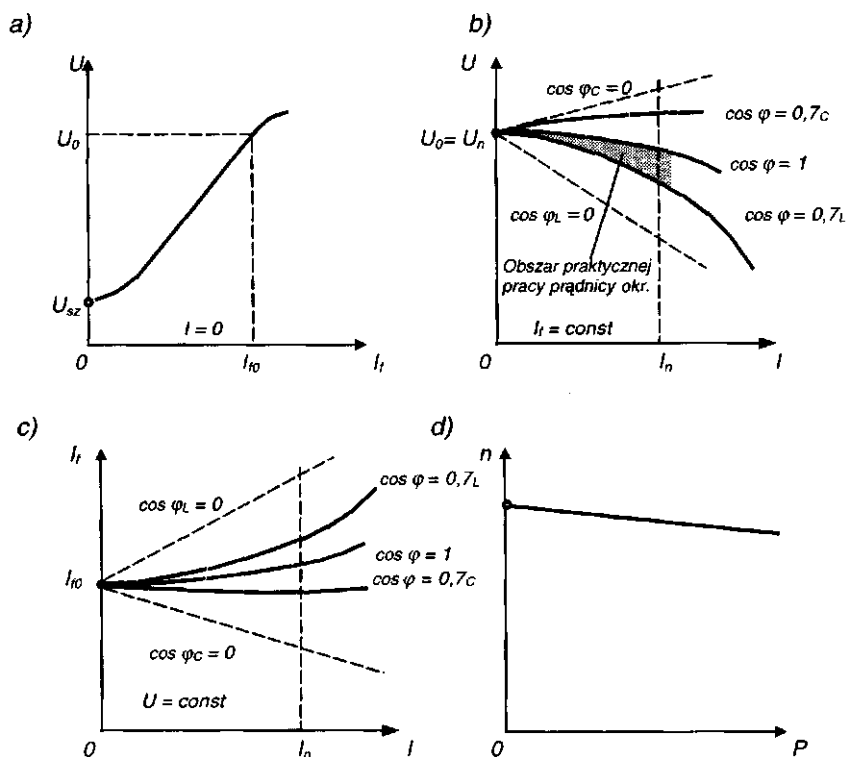
Jeżeli analizuje się pracę prądnicy łącznie z jej silnikiem napędowym, przydatna jest **charakterystyka mechaniczna napędu prądnicy** (rys. 7.2 d):

$$n = f(P) \text{ (przy } U = \text{const i } \cos \varphi = \text{const})$$

gdzie  $P$  - moc czynna obciążająca prądnicę.

Przy samodzielnej pracy prądnicy charakterystyka mechaniczna może być wyrażona również przez równoważną zależność:

$$f = f(P) \quad (\text{przy } U = \text{const i } \cos \varphi = \text{const})$$



Rys.7.2. Charakterystyki prądnicy synchronicznej przy  $U = \text{const}$  i  $\cos \varphi = \text{const}$ :  
a) biegu jałowego; b) zewnętrzna; c) regulacyjna; d) mechaniczna napędu prądnicy;  
 $U_K$  - napięcie szczytowe,  $I_n$  - prąd znamionowy obciążenia,  $U_n$  - napięcie znamionowe

## 7.2. Prądnice okrętowe

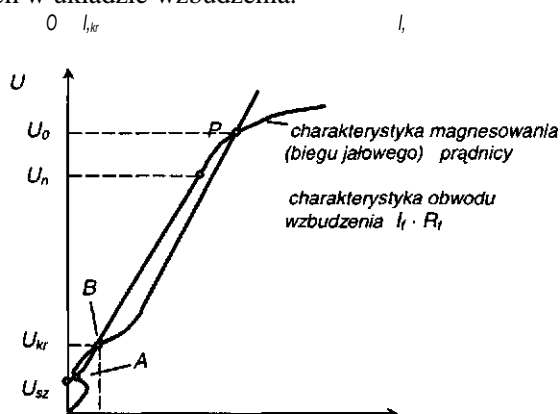
### 7.2.1. Regulacja napięcia prądnic okrętowych

Cechą charakterystyczną prądnic okrętowych w porównaniu do elektrowni lądowych jest mała moc jednostkowa. Wynika stąd niekorzystny stosunek mocy zespołów prądotwórczych do mocy dużych odbiorników. Każde załączenie lub wyłączenie takiego odbiornika może wywoływać wahania napięcia sieci odczuwalne jako uciążliwe. Regulatory napięcia prądnic łagodzą skutki tego zjawiska.

W elektroenergetycznych układach lądowych występuje sieć „sztywna”, bowiem moc źródeł jest znaczna w stosunku do mocy pracujących odbiorników, a nagłe zmiany obciążenia występują rzadko. Sieć okrętowa jest natomiast tzw. siecią „miękką”, w której moc źródeł jest porównywalna z mocą dużych odbiorników. Stąd wahania napięcia są duże i działanie regulatorów musi być skuteczniejsze.

Proces samowzbudzenia prądnic synchronicznych przebiega podobnie jak w prądnicach bocznikowych prądu stałego. Potrzebny jest magnetyzm szczątkowy, dostatecznie mała rezystancja obwodu wzbudzenia i dogodna krzywizna początkowej części charakterystyki magnesowania. Szczególnie ważne jest zapewnienie małej rezystancji przejścia między szczotkami i pierścieniami przez dobry docisk. Przy małych prądach rezystancja ta silnie wzrasta, utrudniając proces samowzbudzenia początkowego poprzez deformację charakterystyki na-pięciowo-prądowej obwodu wzbudzenia. Pokazano to na rys. 7.3 - przy małych prądach wzbudzenia charakterystyka obwodu wzbudzenia nie przebiega poniżej charakterystyki magnesowania i proces samowzbudzenia *zatrzyma* się w punkcie A.

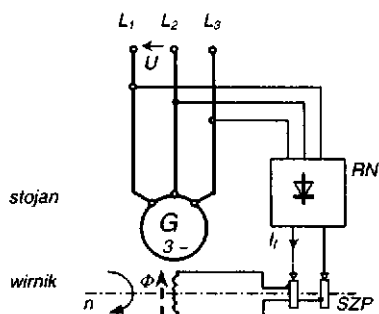
Stosuje się różne sposoby, aby ten warunek poprawić, tzn. zwiększyć środki wspomaganie procesu wzbudzania początkowego, zapewniając szybki wzrost napięcia biegu jałowego powyżej progowego napięcia krytycznego  $U_{kr}$  (pkt. B na rys. 7.3). Nazywa się to także forsowaniem wzbudzenia początkowego. Polega ono na doprowadzeniu do obwodu wzbudzenia napięcia stałego z baterii akumulatorów, prądnicy tachometrycznej, czy wyprostowanego napięcia ze specjalnego transformatora podwyższającego napięcie szczątkowe  $U_{sz}$  powyżej krytycznego  $U^{\wedge}$ . Bardzo często prąd wzbudzenia zwiększa się przez efekt rezonansu szeregowego dodatkowej baterii kondensatorów i indukcyjności dławika, umieszczonych w układzie wzbudzenia.



**Rys. 7.3.** Deformacja charakterystyki obwodu wzbudzenia utrudniająca proces samowzbudzenia

W okrętowych systemach elektroenergetycznych występują najczęściej prądnice synchroniczne samowzbudne **pierścieniowe** i samowzbudne bezpierścieniowe (częściej stosowana nazwa **bezsztotkowe**).

W prądnicach samowzbudnych pierścieniowych uzwojenie wzbudzenia jest zasilane napięciem przez nią wytworzonym poprzez prostownik półprzewodnikowy oraz dwa zestyki ślizgowe pierścieni - szczotka (rys. 7.4).

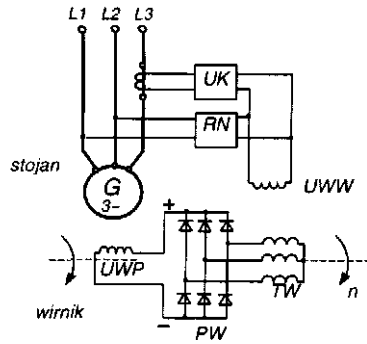


Rys. 7.4. Uproszczony schemat zasilania uzwojenia wzbudzenia w prądnicie samowzbudnej pierścieniowej: *RN* - regulator napięcia, *SZP* - złącze pierścieni - szczotka

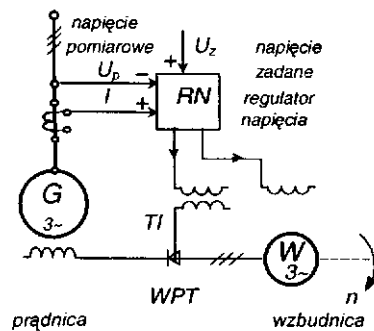
Nowszym rozwiązaniem prądnic synchronicznych są prądnice bezszotkowe. Wyeliminowano w nich kłopotliwy w eksploatacji element ślizgowy pierścieni - szczotka. Są to prądnice z dodatkową prądnicą- **wzbudnicą**, przy czym twornik wzbudnicy znajduje się na wspólnym wale z uzwojeniem wzbudzenia prądnicy, a uzwojenie wzbudzenia wzbudnicy jest stacjonarne, tzn. umieszczone w stojanie maszyny. Napięcie przemienne wytworzone w tworniku wzbudnicy po wyprostowaniu w prostowniku wirującym zasila wzbudzenie prądnicy. Uproszczony schemat takiej prądnicy pokazano na rys. 7.5.

Oddzielna wzbudnica wprowadza dodatkową inercję do układu regulacji napięcia (większa stała czasowa elektromagnetyczna), co pogarsza właściwości dynamiczne tego układu. Innym układem wzbudzenia prądnic bezszotkowych jest zastosowanie wirującego sterowanego prostownika tyrystorowego, co pokazano na rys. 7.6.

Impulsy wyzwalające do tyrystorów mostka doprowadza się bezstykowo przez transformatory impulsowe *TI*. Komplikuje to układ regulacji napięcia i znacznie zwiększa się stała czasowa elektromagnetyczna.



Rys. 7.5. Uproszczony schemat zasilania wzbudzenia w prądnicy bezszczotkowej:  
*RN* - regulator napięcia, *UK*- układ kompensacyjny, *PW*- prostownik wirujący,  
*TW*- twornik wzbudnicy, *UWW*- uzwojenie wzbudzenia wzbudnicy,  
*UWP* - uzwojenie wzbudzenia prądnicy

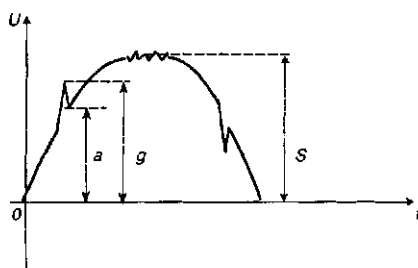


Rys. 7.6. Uproszczony schemat zasilania wzbudzenia prądnicy bezszczotkowej  
z wirującym prostownikiem sterowanym: *WPT*- wirujący  
prostownik sterowany, *TI* - transformatory impulsowe

Prądnice wałowe napędzane z wału głównego przez przekładnię (najczęściej zębata) są z reguły prądnicami bezszczotkowymi. Przy większych mocach prądnica wałowa może być umieszczona w osi silnika głównego po stronie przeciwnej niż wał śrubowy.

Prądnice okrętowe wytwarzają napięcie o przebiegu sinusoidalnym. Na przebieg ten nakładają się zniekształcenia oraz wyższe harmoniczne prądu i napięcia o wysokiej częstotliwości, wytwarzane przez prostowniki diodowe i tyrystorowe, występujące w układach regulacji napięcia. Mają one wpływ na pracę urządzeń radiokomunikacyjnych na statku (w postaci tzw. zakłóceń radioelektrycznych). Dopuszczalny poziom tych zakłóceń określają dokładnie przepisy

PRS. Wpływ zniekształceń na krzywą napięcia wytwarzanego przez prądnicę przedstawiono na rys. 7.7.



Rys. 7.7. Wpływ zakłóceń radioelektrycznych na kształt krzywej napięcia

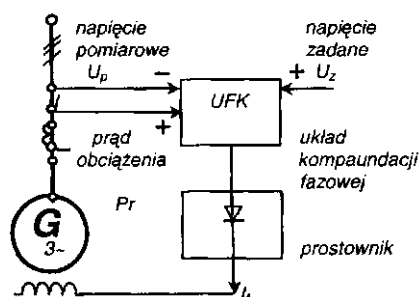
Kształt krzywej wytwarzanego napięcia uważa się za praktycznie sinusoidalny, jeżeli dowolna wartość chwilowa tego napięcia nie będzie się różnić od odpowiedniej wartości pierwszej harmonicznej (ma ona częstotliwość 50 Hz) więcej niż o 5% jej amplitudy. Stosując zatem oznaczenia według rys.7.7 powinno być spełnione:

$$\frac{a - g}{S} 100\% \leq 5\% \quad (7-6)$$

lub

$$(a - g) \geq 0,05S \quad (7.7)$$

Najczęściej spotykanym układem zasilania uzwojenia wzbudzenia jest układ szeregowo-bocznikowy zwany też układem kompaundacji fazowej (UFK). Zasadę budowy takiego układu przedstawiono na rys. 7.8.



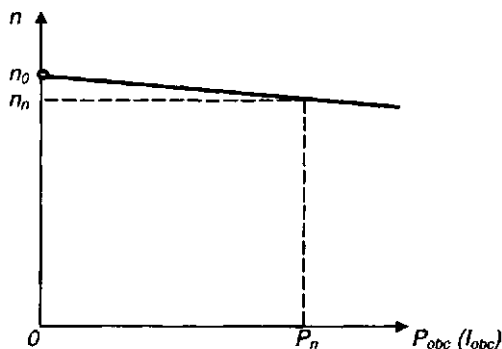
Rys. 7.8. Zasada działania układu kompaundacji fazowej regulacji napięcia

Zasada działania układu fazowej kompaundacji wzbudzenia polega na tym, że wartość prądu wzbudzenia //jest uzależniona nie tylko od obciążenia prądnicy, lecz i od kąta przesunięcia fazowego  $\angle p$  między prądem obciążenia a napięciem. Zachodzi to wówczas, kiedy sygnały toru sprzężenia zwrotnego (napięciowy i prądowy) sumują się przed wyprostowaniem w prostowniku  $Pr$ . Jest to sumowanie geometryczne. Układ taki pozwala na utrzymywanie dużej stałości napięcia w sieci okrętowej,

## 7.2.2. Przepisy PRS dotyczące stabilizacji napięcia i częstotliwości

Przepisy towarzystw klasyfikacyjnych, a w tym PRS, stawiają wymagania dotyczące stałości napięcia w sieci okrętowej tak w warunkach pracy statycznej, jak i dynamicznej (a więc przy powolnych oraz skokowych zmianach obciążenia)

Na podstawie wzoru (7.3), przy stałych wartościach indukcji  $B$  i prędkości  $v$ , siła elektromotoryczna  $E$  powinna też być stała. W praktyce jednak prędkość obrotowa silnika napędowego zależy od **regulatora obrotów silnika** i od obciążenia (charakterystyka mechaniczna napędu prądnicy - rys. 7.9) a ze strony elektrycznej - od dokładności pracy **regulatora napięcia**. Z tych względów napięcie również może ulegać zmianie.

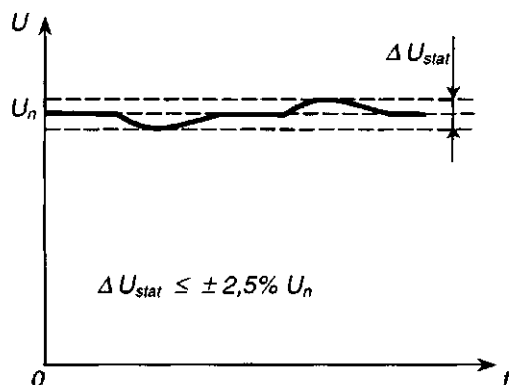


Rys. 7.9. Zależność prędkości silnika napędowego od obciążenia

Wielkością przydatną do określenia stopnia nachylenia charakterystyki z rys. 7.9 jest **statyzm charakterystyki - S**:

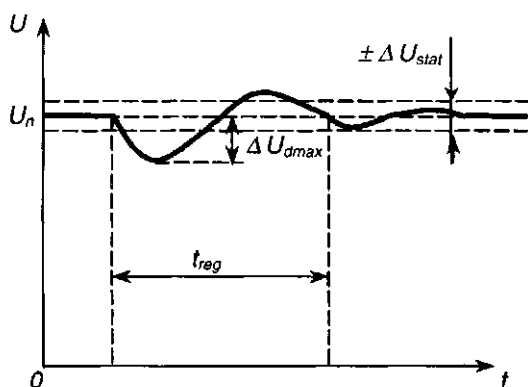
$$S = \frac{n_0 - n_n}{n_n} 100\% \quad (7.8)$$

Przepisy PRS wymagają, aby w warunkach **pracy statycznej** napięcie było utrzymywane jako stałe z dokładnością  $\pm 2,5\% U_n$  (rys. 7.10).



Rys. 7.10. Dopuszczalne zmiany napięcia przy pracy statycznej

W chwili załączania lub wyłączenia dużego odbiornika w sieci okrętowej występuje krótkotrwała (**dynamiczna**) zmiana napięcia. Wartość tej zmiany nie może zakłócić pracy systemu energetycznego na statku. Zadaniem regulatora napięcia jest doprowadzenie do stanu ustalonego w możliwie krótkim czasie (rys. 7.11).



Rys. 7.11. Dopuszczalne zmiany napięcia w stanach dynamicznych



Przepisy PRS wymagają, aby po skokowym wzroście obciążenia zmiana napięcia była:

$$\Delta U_{dmax} \leq 15\% U_n$$

a po wyłączeniu obciążenia:

$$\Delta U_{dmax} \leq 20\% U_n$$

przy czym czas regulacji  $t_{reg}$  („odbudowy” napięcia) nie przekraczał 1,5 s. Czas ten określony jest od chwili udaru obciążenia do momentu powrotu napięcia w zakres pracy statycznej.

**Stabilizacja częstotliwości** zależy od stabilności prędkości obrotowej silników napędowych i regulatora obrotów.

Przepisy PRS wymagają, aby wahania częstotliwości przy obciążeniu statycznym nie przekraczały:

$$\Delta f_{stat} \leq \pm 5\% f_n$$

a przy dynamicznych zmianach obciążenia:

$$\Delta f_{dyn} \leq -10\% f_n$$

przy czasie regulacji nie przekraczającym 5 s.

W praktyce okrętowej rzeczywiste czasy regulacji w stanach dynamicznych są znacznie korzystniejsze, gdyż wynoszą ok. 0,2 - 0,3 s dla prądnic pierścieniowych i do 1 s dla prądnic bezszczotkowych.

## 7.3. Praca równoległa prądnic

### 7.3.1, Synchronizacja prądnic

W przypadku konieczności dołączenia jednej prądnicy synchronicznej do pracy równoległej z drugą, już pracującą, należy wykonać czynność zwaną **synchronizacją**. Polega ona na doprowadzeniu do takiego stanu, aby przebiegi napięć chwilowych w odpowiadających sobie fazach obu prądnic były jednakowe. Jest to **warunek ogólny synchronizacji**:

$$u_{I1} = u_{II} \quad \text{czyli} \quad U_{mI1} \sin \omega_1 t = U_{mII} \sin \omega_{II} t$$

gdzie  $\omega_1 = 2 \pi f_1$     i     $\omega_{II} = 2 \pi f_{II}$

Z warunku ogólnego wynikają szczególne **warunki synchronizacji**:

1. **Taka sama kolejność faz obu prądnic**, co wiąże się ze zgodnością połączeń faz:

$$R_I \leftrightarrow R_{II}, S_I \leftrightarrow S_{II}, T_I \leftrightarrow T_{II}$$

*Warunek ten jest zrealizowany i sprawdzany przy montażu prądnic na statku oraz przed pierwszym rozruchem; obsługa w czasie eksploatacji nie sprawdza tego warunku.*

2. **Równość napięć maksymalnych obu prądnic** (a tym samym napięć skutecznych):

$$U_{mI} = U_{mII} \quad \text{lub} \quad U_I = U_{II}$$

*Warunek ten spełnia automatyczny regulator napięcia i obsługa nie musi dokonywać regulacji (nie dotyczy to stanów awaryjnych); sprawdzenie warunku - odczyt woltomierzy obu prądnic w polu synchronizacji rozdzielnic głównej.*

3. **Jednakowa częstotliwość obu prądnic** (a tym samym jednakowe prędkości wirowania wektorów poszczególnych faz):

$$f_I = f_{II} \quad \text{lub} \quad \omega_I = \omega_{II}$$

*Realizacja warunku - regulacja prędkości silnika napędowego prądnicy zadajnikiem prędkości napędu włączanej prądnicy w polu synchronizacji rozdzielnic głównej; kontrola warunku - odczyt częstotliciomierza podwójnego w tym samym polu.*

4. **Jednakowa wartość fazy kątowej obu prądnic** (a tym samym kąt przesunięcia pomiędzy odpowiednimi wektorami napięcia powinien być równy lub bliski zeru):

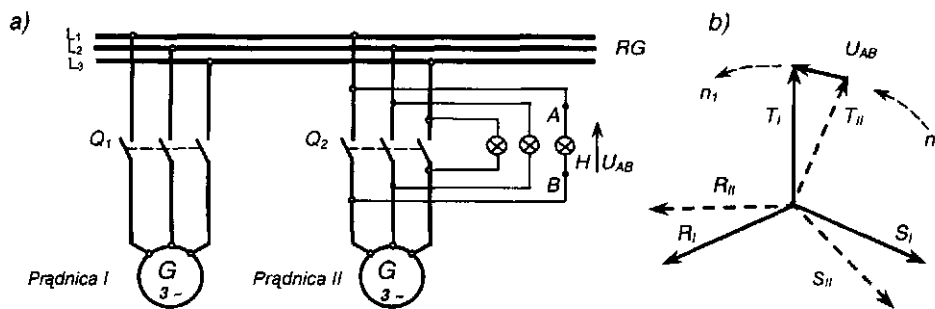
$$\omega_I t = \omega_{II} t$$

*Realizacja warunku - impulsowa regulacja prędkości silnika napędowego prądnicy zadajnikiem prędkości włączanej prądnicy w polu synchronizacji rozdzielnic głównej; kontrola warunku - obserwacja żarówki kontrolnej synchronizacji lub synchronoskopu.*

### 7.3.2. Metody synchronizacji

Synchronizacja może być przeprowadzona ręcznie lub automatycznie. Spośród wielu metod synchronizacji ręcznej na statkach najczęściej stosuje się dwie:

- synchronizacja za pomocą żarówek „na ciemno” (rys. 7.12); stosuje się zestaw trzech żarówek lub (uproszczony) układ z jedną żarówką. Włączenie synchronizowanej (po wyregulowaniu równości faz kątowych) prądnicy powinno następować w chwili zgaśnięcia żarówki;



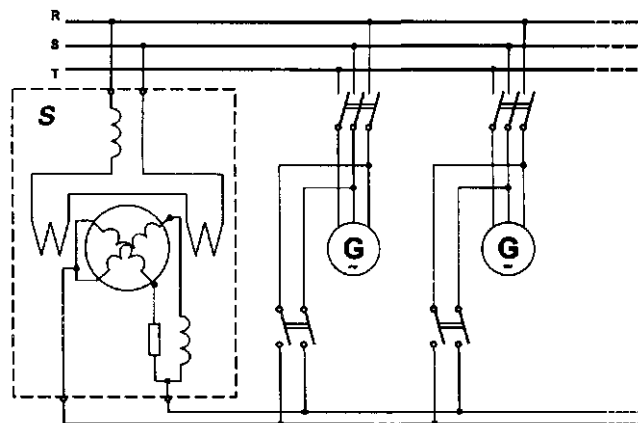
Rys.7.12. Synchronizacja „na ciemno”:

- a) schemat połączeń; b) gwiazdy napięć prądnic;  $RG$  - szyny rozdzielnic głównej,  $Q$  — wyłącznik prądnicy,  $H$  - lampka synchronizacyjna

- synchronizacja za pomocą synchronoskopu wskazówkowego lub elektronicznego. Włączenie prądnicy powinno nastąpić, gdy wskazówka synchronoskopu zatrzyma się (lub będzie powoli przesuwając się) na czerwonym polu tarczy przyrządu. Kierunek wirowania wskazówki ułatwia dodatkowo regulację fazy kątowej, gdyż określa konieczność zwalniania lub przyspieszania napędu prądnicy.

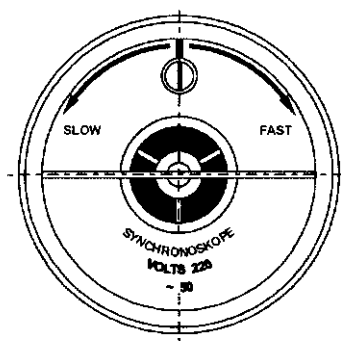
Synchronoskop wskazówkowy jest dwurdzeniowym i dwuuzwojeniowym miernikiem indukcyjnym, którego jedno uzwojenie jest połączone z szynami głównymi rozdzielnic głównej, a drugie z szynami prądnicy (rys. 7.13). Obrotowy rdzeń stalowy poruszający się pod wpływem różnicy fazowej napięć jest sprzężony ze wskazówką. Jeżeli częstotliwość synchronizowanej prądnicy równa się częstotliwości sieci, to Synchronoskop wskazuje przesunięcie fazowe między napięciami prądnic. Gdy wartość kąta fazowego między napięciami jest zbliżona do zera, włącza się prądnicę do sieci. Jeśli częstotliwość prądnicy się zwiększa, to w chwili gdy cewka nieruchoma wytwarza strumień maksymalny, wektor pola wirującego przesunął się już za daleko. Rdzeń ruchomy dążąc do zachowania największego strumienia skojarzonego z cewką nieruchomą przesunął się w kierunku przeciwnym kierunkowi pola wirującego. Im większa jest różnica częstotliwości, tym prędzej rdzeń musi się obracać. Jeżeli częstotliwość prądnicy będzie mniejsza niż częstotliwość sieci, to organ ruchomy będzie się obracać w kierunku pola wirującego.

Na rysunku 7.14 pokazane są skale synchronoskopów. Na rysunku 7.14 a wskazówka synchronoskopu widoczna jest przez otwór w skali. Napisy „Słów” (wolno) i „Fast” (prędko) oznaczają, że prędkość obracania się prądnicy należy zmniejszyć lub zwiększyć. Synchronoskop z rys. 7.14 b jest przyrządem elektronicznym - wskazówka jest zastąpiona przez diody luminescencyjne.

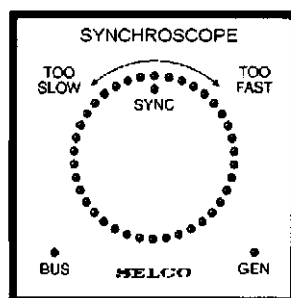


Rys. 7.13. Układ połączeń synchronoskopu

a)



b)



Rys. 7.14. Tarcze synchronoskopów okrętowych: a) synchronoskop prod. Nalder Bros. & Thompson; b) synchronoskop prod. SELCO

Synchronizacja automatyczna jest wykonywana przez urządzenie zwane synchronizatorem. Synchronizator otrzymuje sygnały proporcjonalne do napięć synchronizowanych prądnic i odpowiednio steruje zadajnikiem prędkości napędu synchronizowanej prądnicy. Gdy wartości fazy kątowej obu prądnic zbliżą się do siebie, synchronizator powoduje załączenie wyłącznika głównego

prądnicy. Synchronizator może być włączany przez obsługę po dokonaniu rozruchu silnika napędowego prądnicy i doprowadzeniu jego prędkości do nieco wyższej od nominalnej (jest to tak zwana **synchronizacja półautomatyczna**).

W przypadku siłowni zautomatyzowanej synchronizator zostaje włączony przez automatykę siłowni. Na statku synchronizacja jest przeprowadzana najczęściej w sposób automatyczny, a ręczna ma charakter awaryjny.

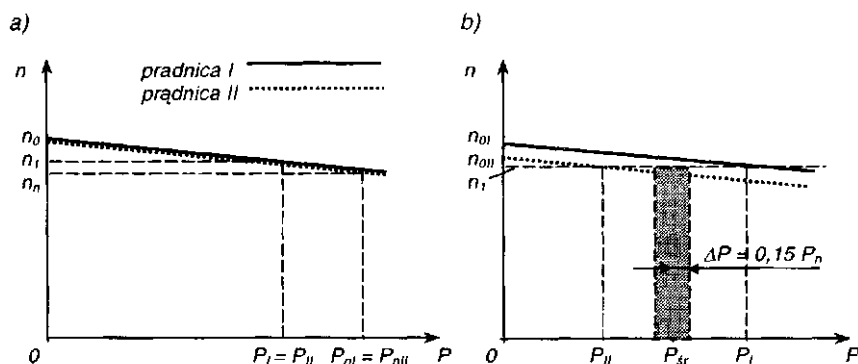
Załączenie prądnicy do pracy równoległej, przy niezbyt dokładnie spełnionych warunkach synchronizacji, wywoła przepływ uderowych prądów wyrównawczych i momenty dynamiczne oddziałujące niekorzystnie pod względem mechanicznym na wirniki, ułożyskowanie i zamocowanie w fundamentach zespołów prądotwórczych. Występuje też tzw. zjawisko „kołysania” zespołów, wpływające również na oświetlenie. O ile zabezpieczenia nie odłączą zespołu, to może ono trwać kilka sekund.

Prawidłowo zsynchronizowana prądnica będzie jałowo. Aby ją obciążyć mocą czynną, trzeba zwiększyć moment mechaniczny na wale zespołu za pomocą regulatora obrotów silnika napędowego. Należy pamiętać, że prądnice pracujące równolegle mają, niezależnie od prędkości obrotowej, tę samą częstotliwość/. Jeżeli nastawione prędkości silników napędowych różnią się nieco, to prądy wyrównawcze płynące między prądnicami wytwarzają dodatkowe momenty utrzymujące jednakową prędkość.

### 7.3.3. Rozpływ mocy czynnej podczas pracy równoległej prądnic

Rozpływ mocy czynnej powinien być proporcjonalny do mocy znamionowych zespołów. Jest to realizowane przez regulację statyzmu (a więc nachylenia charakterystyki - wzór 7.8) charakterystyk regulatorów obrotów silników napędowych  $n = f(P)$ .

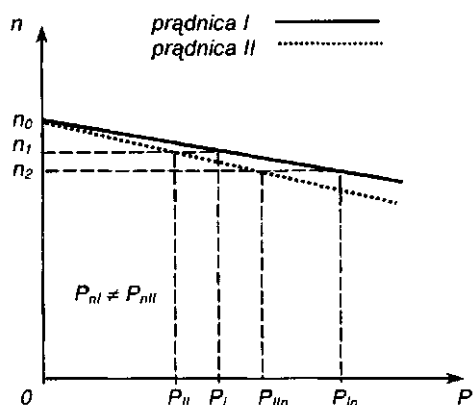
W przypadku pracy zespołów o jednakowych mocach, statyzmy powinny być identyczne i wówczas obciążenia będą takie same (rys. 7.15 a).



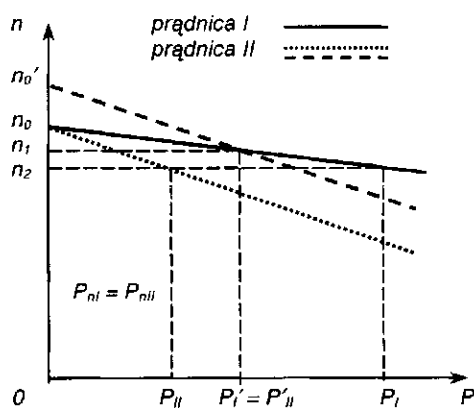
Rys. 7.15. Prawidłowe (a) i nieprawidłowe (b) obciążenie prądnic mocą czynną

Z powodu niedokładności regulatorów obrotów, charakterystyki te mogą być przesunięte równoległe względem siebie, co spowoduje nierównomierny rozptyw mocy czynnej (rys. 7.15 b).

Według wymagań przepisów PRS różnica obciążeń prądnic mocą czynną w stosunku do wartości proporcjonalnego obciążenia nie może być większa niż 15% znamionowej mocy czynnej największej prądnicy.



Rys. 7.16. Prawidłowy rozptyw mocy czynnej dla zespołów o różnych mocach znamionowych



Rys. 7.17. Nieprawidłowe ustawienie statyzmów dla zespołów o jednakowych mocach znamionowych

Jeżeli moce znamionowe zespołów są różne ( $P_I \neq P_{II}$ ), statyzmy charakterystyk powinny być identyczne, wówczas obie prądnice obciążą się proporcjonalnie do swoich mocy znamionowych (rys. 7.16). Musi przy tym zachodzić równość  $n_{OI} = n_{OII}$ .

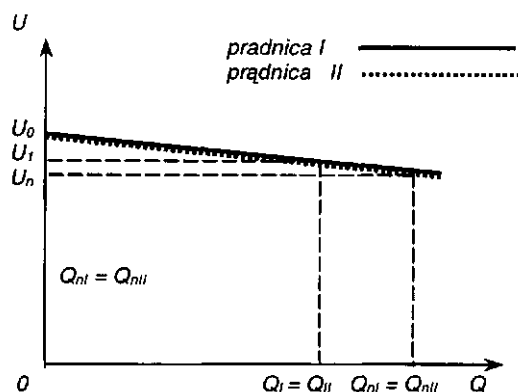
Nieprawidłowe ustawienie statyzmów współpracujących zespołów jest zjawiskiem niekorzystnym, gdyż powoduje nieprawidłowy rozkład obciążenia przy każdej jego zmianie (lub zmianie prędkości obrotowej jednego z zespołów). Przykład nieprawidłowego ustawienia statyzmów dla zespołów o jednakowej mocy przedstawia rys. 7.17.

Należy podkreślić, że w czasie eksploatacji doraźna zmiana proporcji obciążenia współpracujących prądnic dopuszczalna jest tylko przez przesunięcie równoległe charakterystyki  $n = f(P)$  jednego z zespołów za pomocą regulatora obrotów, jak pokazano na rys. 7.17 (przejście z  $n_{i0}$  na  $n_{o'}$ ).

**Przepisy PRS zabraniają regulacji statyzmu, tzn. zmiany nachylenia charakterystyki w warunkach eksploatacji morskiej.**

### 7.3.4. Rozpływ mocy biernej podczas pracy równoległej prądnic

Rozpływ mocy biernej  $Q$  musi być też proporcjonalny do mocy znamionowej prądnic. Jest to realizowane przez równość statyzmów charakterystyk  $U = f(Q)$  prądnic. Przykład prawidłowego rozptywu mocy biernej dla jednakowych prądnic przedstawia rys. 7.18.



Rys. 7.18. Rozpływ mocy biernej przy prawidłowej pracy równoległej prądnic

W praktyce, o ile dla prądnic jednakowych ( $P_I = P_{II}$ ) watomierze wskazują te same moce, a amperomierze różne wartości prądów ( $I_t \neq I_n$ ), to oznacza, że rozpływ mocy biernej nie jest jednakowy i należy **zwiększyć prąd wzbudzenia**

**tej prądnicy**, której prąd obciążenia jest mniejszy. Wykonuje się to przez zmianę nastaw regulatora napięcia. We współczesnych rozwiązaniach rozdzielnic głównych stosuje się watomierze przełączalne na pomiar mocy biernej (por. rozdz. 4.4.3), co jeszcze bardziej ułatwia kontrolę rozplywu mocy.

Rozplyw mocy biernej w zasadzie jest kontrolowany i regulowany automatycznie, gdyż regulatory napięcia są wyposażone w kontroler rozdziału mocy biernej, wpływający na wartość prądu wzbudzenia a przez to na wielkość napięcia. Kontrolery poszczególnych regulatorów są połączone ze sobą połączeniami wyrównawczymi.

W elektrowniach okrętowych w pełni zautomatyzowanych kontrola i regulacja rozplywu mocy biernej i czynnej jest również zautomatyzowana. Dyżurny operator może jednak w każdym systemie ustawić rozplyw mocy dowolnie, jeżeli tego będzie wymagała bieżąca sytuacja.

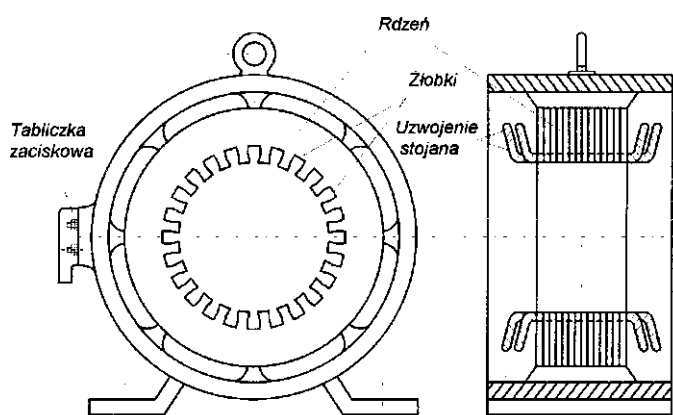


## 8. Silniki asynchroniczne

### 8.1. Budowa i zasada działania silnika asynchronicznego

#### 8.1.1. Budowa silników asynchronicznych

Silnik asynchroniczny (zwany też **silnikiem indukcyjnym**) jest najbardziej rozpowszechnionym silnikiem prądu przemiennego. Ze względu na rodzaj napięcia zasilającego wyróżniamy silniki asynchroniczne trójfazowe oraz jedno-fazowe. Silniki asynchroniczne trójfazowe ze względu na budowę dzielą się na klatkowe i pierścieniowe. W obu przypadkach w żłobkach na rdzeniu stojana rozmieszczone jest izolowane uzwojenie trójfazowe, które można łączyć w gwiazdę lub trójkąt. Budowę stojana pokazano na rys. 8.1.

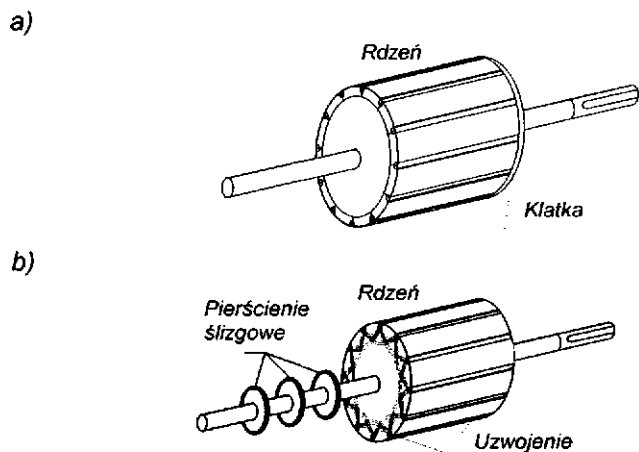


Rys. 8.1. Budowa stojana maszyny asynchronicznej

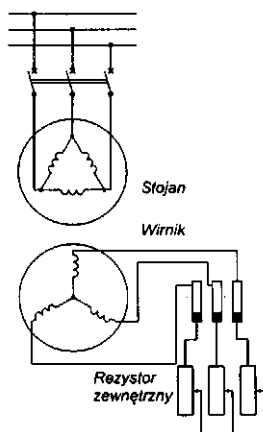
**W wirniku klatkowym** żłobki wypełnione są klatką z prętów aluminiowych lub miedzianych (nie izolowanych) zwartych na końcach za pomocą pierścieni. Brak izolacji prętów jest podyktowany tym, że napięcia występujące tam podczas pracy są bardzo małe - rzędu kilku procent napięcia znamionowego. Pierścienie są wyposażone w skrzydełka, stanowiące wentylatory do chłodzenia

własnego silnika podczas pracy. Klatka jest najczęściej odlewem - rdzeń wirnika umieszcza się w formie i zalewa płynnym metalem. Budowę klatki wirnika pokazano na rys. 8.2 a.

**Wirnik pierścieniowy** (rys. 8.2 b) uzwojony jest analogicznie jak stojan i połączony w gwiazdę bez wyprowadzonego punktu zerowego. Początki uzwojeń doprowadzone są do tabliczki zaciskowej przez 3 zestyki ślizgowe pierścieni - szczotka. Umożliwia to włączenie do obwodu wirnika 3-fazowego rezystora rozruchowego. Schemat połączeń wirnika pierścieniowego został przedstawiony na rys. 8.3. Wirnik pierścieniowy wyposażony jest również w wentylator do chłodzenia własnego.

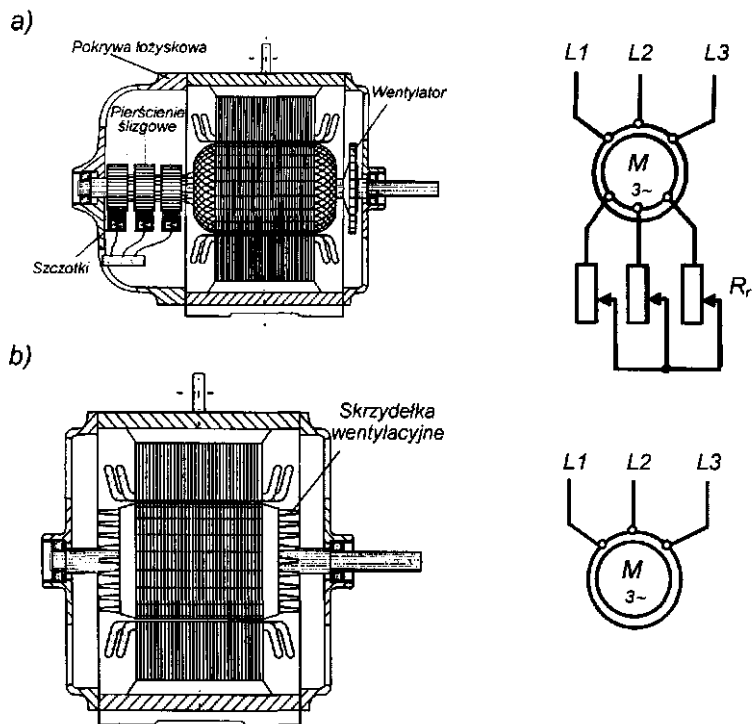


Rys. 8.2. Wirniki silników asynchronicznych:  
 a) silnik klatkowy; b) silnik pierścieniowy



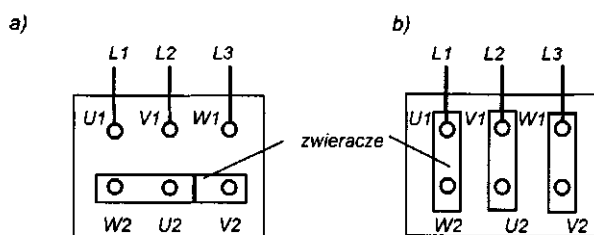
Rys. 8.3. Schemat połączeń silnika pierścieniowego z rozrusznikiem

Przekroje podłużne silników asynchronicznych pierścieniowego i klatkowego oraz ich symbole stosowane na schematach pokazano na rys. 8.4.



Rys. 8.4. Przekroje podłużne oraz oznaczenia silników asynchronicznych: a) pierścieniowego, b) klatkowego

Jak już wcześniej wspomniano, uzwojenie stojana silnika łączy się w trójkąt lub gwiazdę. Łączenie wykonuje się na tabliczce zaciskowej silnika, na którą wyprowadzone są początki i końce faz uzwojenia, przy czym dla ułatwienia w łączeniu, zaciski końców uzwojeń są przesunięte o jedno miejsce w prawo, żeby położenie zwieraczy było pionowe (rys. 8.5).



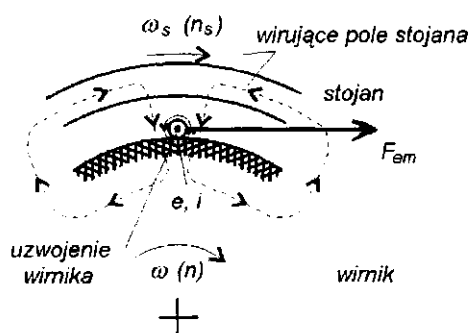
Rys. 8.5. Połączenia uzwojeń stojana w gwiazdę (a) i trójkąt (b)

### 8.1.2. Zasada działania i charakterystyki silnika asynchronicznego

Układ uzwojeń stojana rozmieszczonych w przestrzeni co  $120^\circ$  elektrycznych i zasilanych symetrycznym prądem trójfazowym (w którym napięcia kolejnych faz są przesunięte w fazie co  $120^\circ$ ) ma tę właściwość, że wytwarza **wirujące pole magnetyczne** o prędkości zwanej synchroniczną, wyrażanej w postaci prędkości kątowej  $\omega_s$  [rad/s], lub prędkości obrotowej  $n_s$  [obr/min]:

$$\omega_s = \frac{2\pi f}{p} \quad \text{lub} \quad n_s = \frac{60 f}{p}$$

Linie tego pola zamykają się przez rdzeń stojana, szczelinę powietrzną, wirnik, szczelinę i stojan przecinając uzwojenie wirnika. W uzwojeniu tym indukuje się siła elektromotoryczna o zwrocie zgodnym z regułą prawej dłoni. Gdy obwód wirnika jest zamknięty to pod wpływem SEM popłynie prąd wytwarzający własne pole magnetyczne. Wzajemne oddziaływanie obu pól wytwarza **siłę elektrodynamiczną**  $F_{em}$  działającą na pręty uzwojenia wirnika **o kierunku zgodnym z regułą lewej dłoni**. Siła ta ma zwrot zgodny z prędkością wirowania pola stojana i nadaje ruch obrotowy wirnikowi zgodny z obiegiem tego pola (rys. 8.6).



Rys. 8.6. Zasada działania silnika asynchronicznego

Można umownie powiedzieć, że wirujące pole stojana „pociąga” za sobą wirnik. Korzystając z reguły prawej dłoni należy pamiętać, że decyduje względny ruch przewodu względem pola, czyli przy stojącym wirniku przeciwnie do ruchu pola. Ponieważ indukowanie się SEM w wirniku możliwe jest tylko podczas przecinania prętów uzwojenia przez pole stojana, więc wirnik nie może osiągnąć prędkości synchronicznej i będzie ona zawsze mniejsza ( $\omega < \omega_s$ ) tak, aby istniała siła elektromagnetyczna. Wirnik obraca się więc z pewnym opóź-

nieniem w stosunku do pola stojana, inaczej - biegnie **asynchronicznie** w stosunku do pola (stąd pochodzi nazwa silników). Opóźnienie to nazywamy **poślizgiem** ( $s$ ) i definiujemy jako:

$$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} 100\% \text{ lub } s = \frac{n_s - n}{n_s} 100\% \quad (8.2)$$

stąd 
$$n = (1-s) n_s \quad (8.3)$$

Poślizg znamionowy (przy obciążeniu znamionowym) wynosi zazwyczaj  $s_n = 2 \text{ H- } 6\%$ . Silnik asynchroniczny pierścieniowy, przy rozwartych uzwojeniach wirnika zachowuje się jak transformator w stanie jałowym i indukuje się w nim, wówczas SEM oznaczana  $E_{20}$  (podawana na tabliczce znamionowej silnika). Podczas pracy napięcie i częstotliwość w wirniku maleją w miarę wzrostu prędkości w sposób następujący:

$$E_{2s} = s \cdot E_{20} \quad (8.4)$$

oraz 
$$f_{2s} = s \cdot f_1 \quad (8.5)$$

Na przykład, jeżeli  $E_{20} = 100 \text{ V/i}$ ,  $f_1 = 50 \text{ Hz}$ ,  $s_n = 5\%$  (poślizg znamionowy przy pełnym obciążeniu) to:

$$E_2 = 0,05 \cdot 100 = 5 \text{ V} \quad \text{oraz} \quad f_2 = 0,05 \cdot 50 = 2,5 \text{ Hz}$$

Przy tak małym napięciu pręty wirnika klatkowego nie muszą mieć izolacji, bowiem są odlane w wirniku, składającym się z blach izolowanych od siebie. Jeżeli silnik jest nieobciążony (znajduje się w stanie biegu jałowego), jego współczynnik mocy od strony sieci jest bardzo mały ( $\cos \varphi \ll 0,1$ ) i pogarsza on wtedy  $\cos \varphi$  sieci zasilającej.

Zmiana kierunku wirowania (**nawrót**) silnika asynchronicznego jest realizowana przez zmianę kierunku wirowania pola stojana. Uzyskuje się to przez wzajemną zamianę dwóch dowolnych przewodów zasilających silnik.

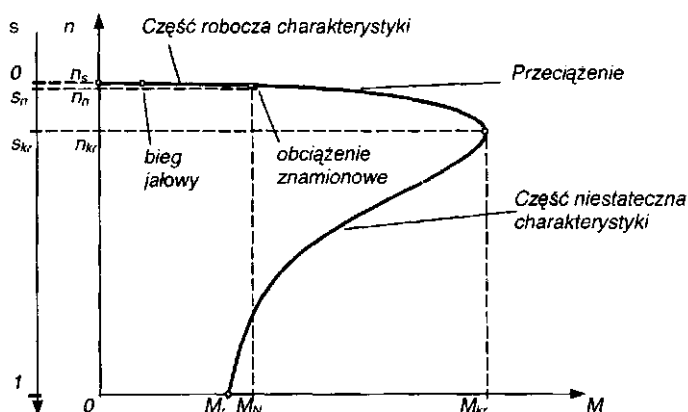
Właściwości ruchowe silnika asynchronicznego przedstawia **charakterystyka mechaniczna**  $n = f(M)$  (rys.8.7), czyli zależność prędkości wirnika od momentu na wale. Jest ona zbliżona dla obu typów silnika.

Po przekroczeniu momentu krytycznego  $M_k$  (np. przy znacznym przeciążeniu) silnik przechodzi na niestaczną część charakterystyki mechanicznej, czyli „utyka” (samoczynnie prędkość maleje do zera).

Na tabliczce znamionowej silnika podawana jest tylko prędkość « $n_n$ » przy obciążeniu znamionowym. Mając tę prędkość, można określić prędkość

synchroniczną pola i poślizg znamionowy. Na przykład, jeżeli  $n_n = 1425$  obr/min, to wiadomo, że najbliższa prędkość synchroniczna (przy  $f_s = 50$  Hz) wynosi  $n_s = 1500$  obr/min, więc poślizg:

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_n} 100\% = \frac{1500 - 1425}{1500} 100\% = 5\%$$



Rys. 8.7. Charakterystyka mechaniczna naturalna silnika asynchronicznego:  
 $n_0$  - prędkość biegu jałowego,  $n_n$  - prędkość znamionowa,  $n_{kr}$  - prędkość krytyczna,  
 $M_r$  - moment rozruchowy,  $M_n$  - moment znamionowy,  $M_{kr}$  - moment krytyczny

Typowe parametry użytkowe silników asynchronicznych:

prędkość biegu jałowego	$n_0$	-	$(0,96 \div 0,99) n_s$	$(s_0 = 0,04 \div 0,01)$
prędkość nominalna	$n_n$	-	$(0,93 \div 0,95) n_s$	$(s_n = 0,07 \div 0,05)$
prędkość krytyczna	$n_{kr}$	-	$(0,85 \div 0,90) n_s$	$(s_{kr} = 0,15 \div 0,1)$
moment rozruchowy	$M_r$	-	$(0,8 \div 2) M_n$	
moment krytyczny	$M_{kr}$	-	$(1,8 \div 2,5) M_n$	

Na tabliczce znamionowej podaje się moc znamionową w kW. Aby obliczyć moment należy skorzystać z zależności:

$$P_n = M_n \cdot \omega_n$$

przy czym:

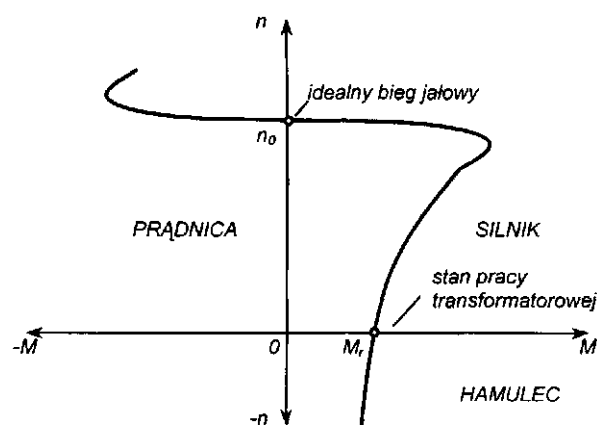
$$\omega_n = \frac{2 \pi n_n}{60}$$

stąd:

$$M_n = \frac{60}{2\pi} \frac{P_n}{n_n} \quad \text{lub} \quad M_n = 9,55 \frac{P_n}{n_n} \quad (8.6)$$

Na tabliczce znamionowej podane jest napięcie zasilające uzwojenie stojana. Najczęściej są to dwie wartości, np. 220/380 V. Oznacza to, że pierwsza wartość dotyczy połączenia uzwojeń stojana w trójkąt i silnik można zasilac z sieci trójfazowej  $3 \times 220$  V. Druga wartość dotyczy połączenia uzwojeń stojana w gwiazdę i wówczas silnik można zasilac z sieci trójfazowej o napięciu  $3 \times 380$  V. W obu przypadkach silnik rozwija tę samą moc na wale.

Rysunek 8.7. pokazuje charakterystykę silnika tylko w zakresie pracy silnikowej. Silnik asynchroniczny jak każda maszyna elektryczna jest maszyną odwracalną i może pracować jako prądnica. Rysunek 8.8 przedstawia charakterystykę maszyny asynchronicznej uwzględniającą stan pracy prądnicowej (wykorzystywany przy hamowaniu prądnicowym silnika lub np. w elektrowniach wiatrowych i małych wodnych) oraz stan pracy hamulcowej wykorzystywany przy hamowaniu przeciwwądem (por. rozdz. 8.3.4).



Rys. 8.8. Charakterystyka mechaniczna maszyny asynchronicznej

Silniki asynchroniczne jako maszyny bezkomutatorowe są prostsze w budowie od silników prądu stałego, lecz dość kłopotliwe pod względem regulacji prędkości obrotowej. Mają jednak wiele cech pozytywnych i wobec stosowania na statkach systemów elektroenergetycznych prądu przemiennego są tam powszechnie stosowane.

## 8.2. Rozruch silników asynchronicznych

### 8.2.1. Przebieg rozruchu silnika asynchronicznego

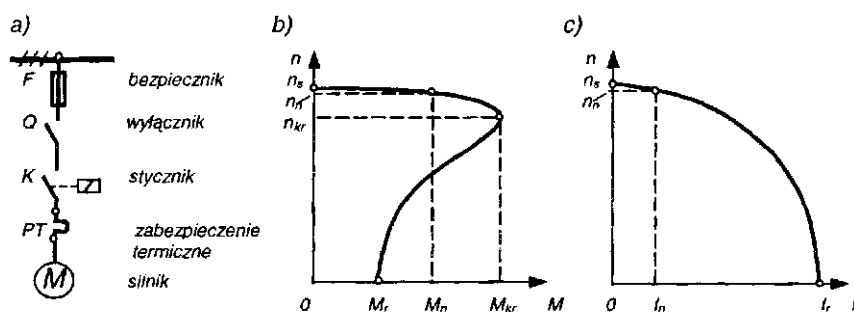
Najbardziej rozpowszechnionym sposobem rozruchu silników klatkowych na statkach jest **rozruch bezpośredni**. Polega on na włączeniu silników do sieci bez dodatkowych urządzeń regulacyjnych. W czasie rozruchu występuje duży prąd rozruchowy, który szybko maleje do wartości nominalnej. Z reguły zachodzą relacje:

- moment rozruchu  $M_r = (0,8 \div 2) M_n$ ,
- prąd rozruchowy  $I_r = (5 \div 7) I_n$ ,
- czas rozruchu  $t_r = (0,2 \div 0,5) s$ .

Silniki asynchroniczne włączane bezpośrednio do sieci pobierają dość znaczne prądy rozruchowe, stąd można włączać bezpośrednio do sieci zasilającej silniki o niewielkiej mocy:

- w instalacjach lądowych rzędu 3-5 kW,
- w instalacjach okrętowych (w przypadku prądnic o mocy > 600 kVA oraz przewodów zasilających o dużym przekroju) - 50 + 70 kW.

Sposób włączenia bezpośredniego pokazano na rys. 8.9.



Rys. 8.9. Włączanie bezpośrednie silnika klatkowego: a) schemat połączeń; b) charakterystyka mechaniczna; c) charakterystyka prądowa

Dla ograniczenia prądów rozruchowych można:

- w silnikach pierścieniowych włączyć rezystory rozruchowe w obwód wirnika (rys. 8.10);
- w silnikach klatkowych:
  - obniżyć napięcie zasilające autotransformatorem lub dławikiem rozruchowym albo przełączać uzwojenia silnika z połączenia w gwiazdę



## 8.2. Rozruch silników asynchronicznych

### 8.2.1. Przebieg rozruchu silnika asynchronicznego

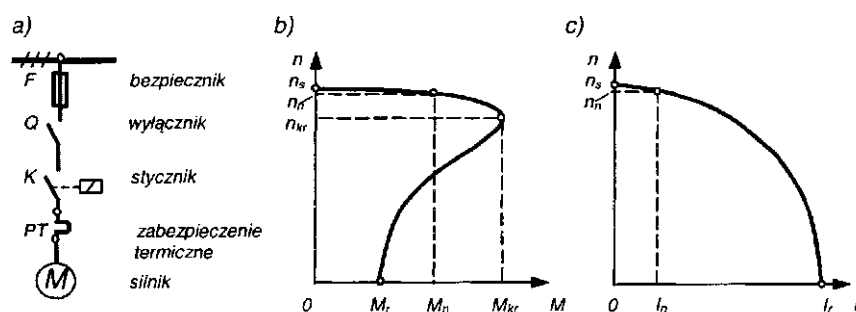
Najbardziej rozpowszechnionym sposobem rozruchu silników klatkowych na statkach jest **rozruch bezpośredni**. Polega on na włączeniu silników do sieci bez dodatkowych urządzeń regulacyjnych. W czasie rozruchu występuje duży prąd rozruchowy, który szybko maleje do wartości nominalnej. Z reguły zachodzą relacje:

- moment rozruchu  $M_r = (0,8 \div 2) M_n$ ,
- prąd rozruchowy  $I_r = (5 \div 7) I_n$ ,
- czas rozruchu  $t_r = (0,2 \div 0,5) s$ .

Silniki asynchroniczne włączane bezpośrednio do sieci pobierają dość znaczne prądy rozruchowe, stąd można włączać bezpośrednio do sieci zasilającej silniki o niewielkiej mocy:

- w instalacjach lądowych rzędu 3-5 kW,
- w instalacjach okrętowych (w przypadku prądnic o mocy > 600 kVA oraz przewodów zasilających o dużym przekroju) - 50-70 kW.

Sposób włączenia bezpośredniego pokazano na rys. 8.9.



Rys. 8.9. Włączanie bezpośrednie silnika klatkowego: a) schemat połączeń; b) charakterystyka mechaniczna; c) charakterystyka prądowa

Dla ograniczenia prądów rozruchowych można:

- w silnikach pierścieniowych włączyć rezystory rozruchowe w obwód wirnika (rys. 8,10);
- w silnikach klatkowych:
  - obniżyć napięcie zasilające autotransformatorem lub dławikiem rozruchowym albo przełączać uzwojenia silnika z połączenia w gwiazdę

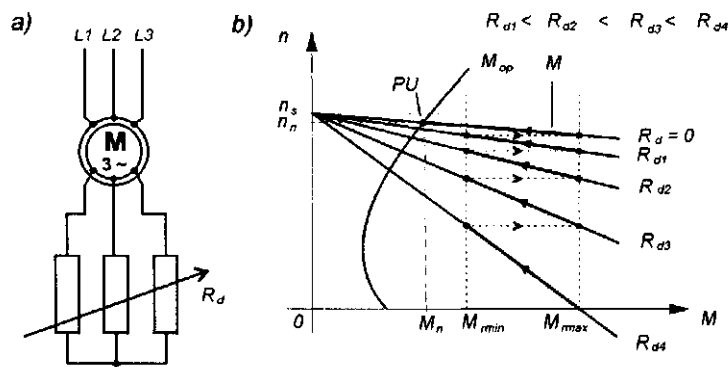
- w czasie rozruchu na połączenie w trójkąt po jego zakończeniu; obniżenie napięcia zasilającego zmniejsza moment ( $M \propto U^2$ ) wytwarzany przez silnik, a także w takim stopniu prąd i moc pobierane przez silnik (rys. 8.11 i 8.13);
- obniżać jednocześnie napięcie  $U$  i częstotliwość  $f$  (z zachowaniem  $U/f = \text{const}$  po to, by utrzymać w przybliżeniu stałą wartość strumienia magnetycznego); zmniejszenie częstotliwości powoduje obniżenie prędkości obrotowej a tym samym zmniejszenie mocy zapotrzebowanej napędu, co pociąga za sobą zmniejszenie prądu pobieranego przez silnik.

Przyspieszenie silnika następuje pod wpływem tzw. **momentu dynamicznego**  $M_d$  tj. różnicy między momentem elektromagnetycznym  $M$  wytwarzanym przez silnik i oporowym  $M_{op}$  na jego wale. Różnica ta musi być dodatnia, gdyż w przeciwnym razie zachodzi hamowanie (por. rozdz. 12.1):

$$M_d = M - M_{op} > 0$$

### 8.2.2. Rozruch silników pierścieniowych

Realizuje się z reguły za pomocą rozrusznika, czyli 3-fazowego **rezystora dodatkowego włączonego w obwód wirnika** (rys. 8.10 a). Charakterystyki mechaniczne sztuczne silnika uzyskane po włączeniu rozrusznika będą zaczynać się w tym samym punkcie  $n_n$  co charakterystyka naturalna, bowiem zmiana rezystancji  $R_j$  ma wpływ tylko na  $n_n$ . Dlatego rozruch ten można przedstawić, zakładając minimalny i maksymalny moment rozruchowy, w sposób pokazany na rys. 8.10 b.



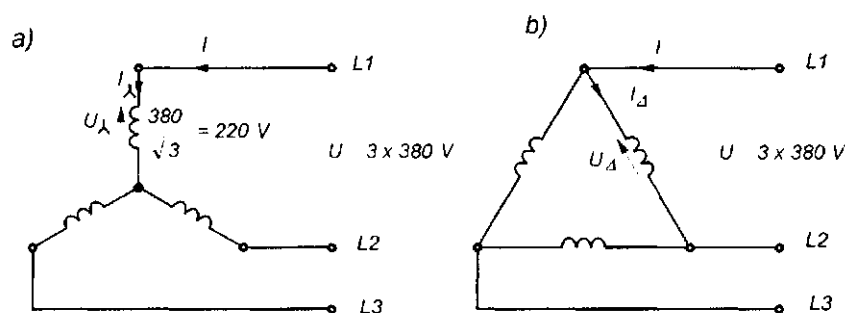
Rys. 8.10. Rozruch 4-stopniowy silnika pierścieniowego:  
 a) schemat połączeń; b) charakterystyki mechaniczne;  $M_{op}$  - moment oporowy maszyny napędzanej,  $PU$  - punkt pracy ustalonej

Rezystory rozruchowe obliczone są pod względem cieplnym na pracę krótkotrwałą. Występują w nich duże straty mocy zamienione na ciepło zgodnie ze wzorem:

$$Q = I^2 \cdot R_d \cdot t$$

### 8.2.3. Rozruch z zastosowaniem przełącznika gwiazda - trójkąt

Popularnym sposobem rozruchu silnika klatkowego, szczególnie w warunkach ładowych, jest rozruch z zastosowaniem przełącznika gwiazda - trójkąt (A/A). Jest to przykład rozruchu przy obniżonym napięciu. Oznacza to, że praca ustalona będzie odbywać się przy połączeniu uzwojeń w trójkąt. Na stopniu rozruchowym, przy połączeniu uzwojeń w gwiazdę, napięcie fazowe jest obniżone o  $\sqrt{3}$ . Obniżenie napięcia powoduje, że moment silnika, moc i prąd przewodowy maleją trzykrotnie. Połączenia uzwojeń pokazano na rys. 8.11. Ten rodzaj rozruchu może być stosowany, gdy początkowy moment oporowy urządzenia napędowego jest mały, czyli dla rozruchów lekkich. Przykładem takich urządzeń są np. wentylatory (moment oporowy wentylatorów jest proporcjonalny do kwadratu prędkości obrotowej  $M_{op} = k \cdot n^2$ ).



Rys. 8.11. Połączenia uzwojeń silnika klatkowego przy rozruchu z przełącznikiem A/A: a) rozruch przy napięciu obniżonym o  $\sqrt{3}$ ; b) praca ustalona

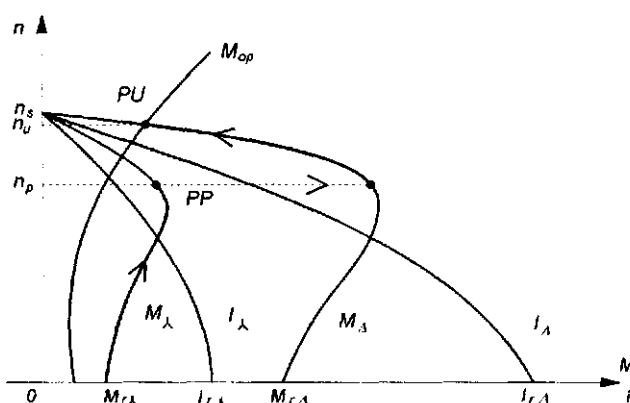
Podczas pracy ustalonej silnika (po zakończeniu rozruchu) uzwojenia są połączone w trójkąt (rys. 8.11 b) i przy napięciu zasilającym  $3 \times 380 \text{ V}$  każda faza jest zasilana napięciem międzyfazowym  $U = 380 \text{ V}$ .

W czasie rozruchu uzwojenia silnika są przełączone na gwiazdę i każda faza będzie wtedy zasilana napięciem fazowym  $U/\sqrt{3} = 220 \text{ V}$ .

Moc oraz prąd pobierane przez silnik w czasie rozruchu będą trzykrotnie mniejsze niż przy pracy ustalonej. Moment rozwijany przez silnik będzie również trzykrotnie mniejszy.

Przebieg rozruchu przedstawiono na rys. 8.12. Przełączenie na pracę ustaloną odbywa się po osiągnięciu przez silnik prędkości równej:

$$n_p \geq (0,7 \div 0,8) n_{ust}$$



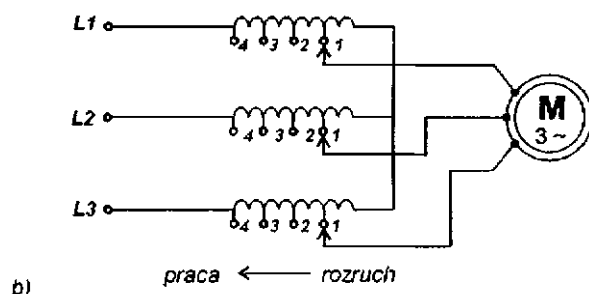
Rys. 8.12. Przebieg rozruchu w układzie gwiazda - trójkąt:  $M_{,,p}$  - moment oporowy,  $PP$  - punkt przełączania uzwojeń,  $PU$  - punkt pracy ustalonej

Jak już wspomniano, silnik o napięciu znamionowym (podanym na tabliczce) 220/380 V może być zasilany z sieci 3 x 220 V, przy połączeniu uzwojeń w trójkąt i z sieci 3 x 380 V, przy połączeniu w gwiazdę. Taki silnik może mieć zastosowany rozruch A/A tylko w sieci 3 x 220 V. bowiem docelowo musi pracować przy połączeniu w trójkąt. **Dla sieci 3 x 380 V silnik musi mieć podane napięcie znamionowe 380/660 V.**

#### 8.2.4. Rozruch silnika klatkowego za pomocą autotransformatora

Uproszczony schemat układu został przedstawiony na rys. 8.13. Włączając silnik przez reaktancję autotransformatora (począwszy od pól. 1) obniża się początkowo napięcie zasilające i moment rozwijany przez silnik ( $M = k \cdot f^2$ ). W miarę wzrostu prędkości przełącza się zaczepty autotransformatora na kolejne stopnie, zwiększając napięcie zasilające i uzyskując coraz większy moment elektromagnetyczny i dalszy wzrost prędkości obrotowej. Ten sposób stosuje się na statkach rzadko. Można czasem spotkać przy rozruchu dużych silników,

np. steru strumieniowego, którego moc jest porównywalna z mocą prądnicą. Odmianą tego sposobu jest zastosowanie rezystorów dodatkowych w obwodzie stojana zamiast autotransformatora. Zastosowanie jest ograniczone, bowiem dwukrotne obniżenie prądu rozruchowego daje czterokrotne zmniejszenie momentu rozwijanego przez silnik.



Rys. 8.13. Rozruch czterostopniowy silnika klatkowego za pomocą autotransformatora

### 8.2.5. Rozruch silników przy obniżonych wartościach napięcia i częstotliwości

Ograniczenie prądów rozruchowych w silnikach klatkowych za pomocą jednoczesnego obniżenia napięcia i częstotliwości na ogół jest realizowane przez energoelektroniczne przemienniki częstotliwości. Ponieważ urządzenia te są stosowane przede wszystkim do regulacji prędkości silnika, również przez zmianę napięcia i częstotliwości, uzyskane charakterystyki zostaną omówione wpkt. 8.3.

## 8.3. Regulacja prędkości obrotowej silników asynchronicznych

### 8.3.1. Regulacja prędkości przez zmianę liczby par biegunów uzwojenia stojana

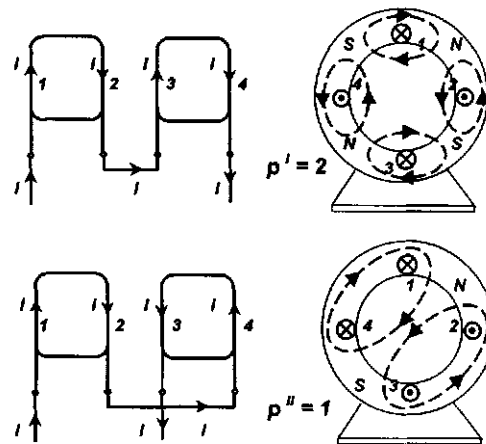
Silniki prądu przemiennego są kłopotliwe pod względem regulacji prędkości obrotowej. Pomimo tego mają wiele cech pozytywnych i dlatego są szeroko stosowane na statkach.

Regulacja prędkości przez zmianę liczby par biegunów jest regulacją skokową, wykorzystującą możliwości konstrukcyjne uzwojeń stojana. Zmieniając połączenia uzwojeń stojana, można uzyskać kilka ilości par biegunów  $p$  a tym samym kilka prędkości synchronicznych  $n_s$ , gdyż:

$$n_s = \frac{60 f}{p}$$

Silniki z przełączalną ilością par biegunów, zwane wielobiegowymi, stosuje się na statkach przede wszystkim do napędu urządzeń pokładowych (wciągarki ładunkowe, kotwiczne, cumownicze).

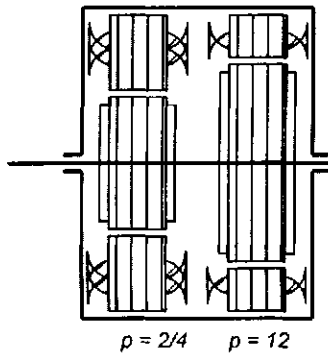
Na rysunku 8.14 przedstawiono schematycznie sposób uzyskania dwóch prędkości obrotowych w silniku dwubiegowym z przełączalnym uzwojeniem stojana. Dla uproszczenia rysunku przedstawiono schematycznie uzwojenie tylko jednej fazy. Taki sposób połączeń umożliwia zmianę ilości par biegunów w stosunku 1:2.



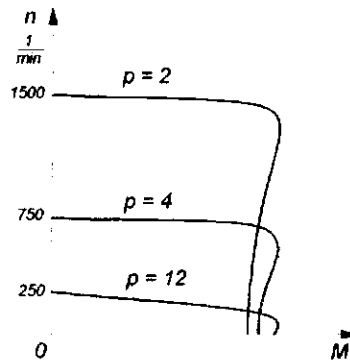
Rys. 8.14. Uzwojenie o przełączalnej liczbie par biegunów

Inną możliwością jest umieszczenie w stojanie dwóch niezależnych uzwojeń o różnej ilości par biegunów. Przez przełączalne lub podwójne uzwojenia stojana można uzyskać do 4 różnych stopni prędkości. Przykład silnika 3-biegowego z podwójnym uzwojeniem pokazano na rys. 8.15. W silniku tym prędkości synchroniczne «<sub>v</sub> wynoszą odpowiednio: dla  $p = 2 + 1$  500 l/min, dla  $p = 4 + 1$  750 l/min oraz dla  $p = 12 + 1$  250 l/min. Ta ostatnia prędkość jest tzw. prędkością „dostawczą” (ustawienia ładunku, wprowadzenia kotwicy do kluzy). Ten sposób regulacji ma cenne zalety jak: ekonomiczność (brak strat mocy w rezystorach dodatkowych), sztywność charakterystyk mechanicznych lub prostota urządzeń regulacyjnych, jakimi są przełączniki i niski koszt wytwarzania. Ten sposób regulacji stosuje się wyłącznie dla silników klatkowych.

a)



b)

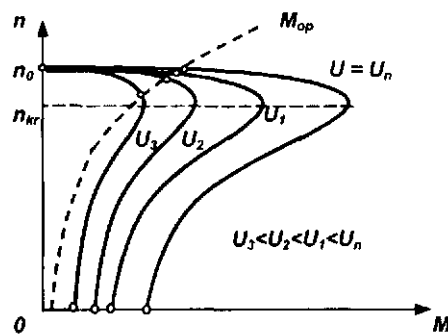


Rys. 8.15. Szkic konstrukcji i charakterystyki mechaniczne silnika trójbiegowego do napędu wind okrętowych

### 8.3.2. Regulacja przez zmianę napięcia zasilającego silnik

Sposób ten realizuje się za pomocą autotransformatorów włączonych jak przy rozruchu silnika klatkowego (rys. 8.13) lub stosując zasilanie silnika przez energoelektroniczny sterownik napięcia (patrz rozdz. 5.3). Przy obniżaniu napięcia zasilającego maleje moment krytyczny  $M_{kr}$  silnika i prędkość na kolejnych charakterystykach mechanicznych, przy stałej prędkości krytycznej ( $n_{kr} = \text{const}$ ), jak pokazano to na rys. 8.16. Tak więc wykorzystano tu naturalny przebieg charakterystyk mechanicznych sztucznych, przy obniżonym napięciu.

Ze względu na ograniczony zakres regulacji prędkości (rzędu kilkunastu %  $n_0$ ) sposób ten nie jest praktycznie używany.



Rys. 8.16. Regulacja prędkości obrotowej zmianą napięcia na zaciskach stojana przy wentylatorowym charakterze obciążenia

### 8.3.3. Regulacja przez zmianę częstotliwości napięcia zasilającego silnik

Zmiana częstotliwości napięcia zasilającego wywołuje przede wszystkim zmianę prędkości wirowania pola magnetycznego, wytwarzanego przez uzwojenie stojana, zgodnie ze wzorem (8.1). Do realizacji tej metody potrzebne jest urządzenie zmiany częstotliwości, włączone między sieć o stałej częstotliwości a stojan silnika. Współcześnie stosuje się układy energoelektroniczne z płynną regulacją częstotliwości.

Aby silnik podczas regulacji częstotliwościowej zachował niezmienny moment krytyczny  $M_{kr}$  (niezmienną przeciążalność), co zachodzi przy stałej wartości strumienia magnetycznego w maszynie ( $\Phi = \text{const}$ ), trzeba jednocześnie z częstotliwością zmieniać napięcie. Wynika to ze wzoru na siłę elektromagnetyczną:

$$E = k \cdot \Phi \cdot \omega \quad \text{a dla} \quad \omega = 2\pi f \quad E = k_1 \cdot \Phi \cdot f$$

stąd, aby  $\Phi = \text{const}$  musi być spełniony warunek:

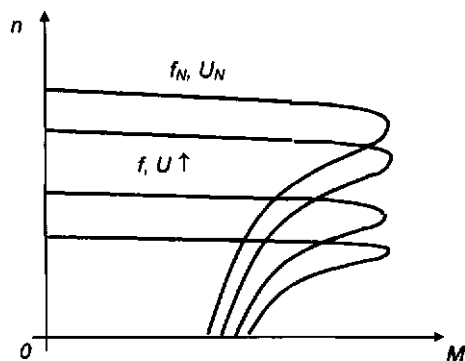
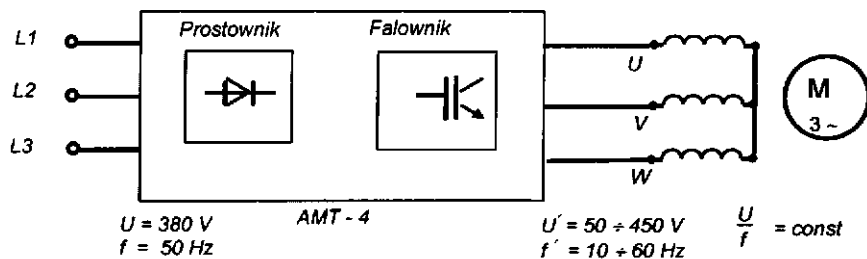
$$\frac{E}{f} \approx \frac{U}{f} = \text{const} \quad (8.9)$$

Napięcie zatem trzeba zmniejszać w takim samym stosunku, jak częstotliwość. Gdy ten stosunek jest zbyt mały - maleje wówczas moment obrotowy wytworzony przez silnik, a gdy zbyt duży - to rośnie nasycenie w obwodzie magnetycznym maszyny i związane z tym straty w żelazie (dodatkowe magnesowanie silnika).

Tranzystorowe przemienniki częstotliwości typu AMT polskiej produkcji przeznaczone są do płynnej regulacji prędkości obrotowej trójfazowych indukcyjnych silników klatkowych. Zachowanie stałego stosunku wartości liczbowych napięcia i częstotliwości wytwarzanych przez przemiennik ( $U/f = \text{const}$ ) powoduje, że silnik pobiera taki sam prąd przy różnych prędkościach obrotowych i tym samym momencie obciążenia. Sterowanie przemiennika może być realizowane jako lokalne lub zdalne.

Przemiennik ogranicza automatycznie prąd rozruchu oraz posiada szereg automatycznych zabezpieczeń silnika przed stanami awaryjnymi. Układ składa się z prostownika trójfazowego, który prąd trójfazowy o stałym napięciu i stałej częstotliwości zamienia na prąd stały oraz falownika, który prąd stały zmienia ponownie na prąd trójfazowy, ale o regulowanych wartościach napięcia i częstotliwości. Schemat blokowy przemiennika oraz charakterystyki mechaniczne silnika przedstawia rys. 8.17.

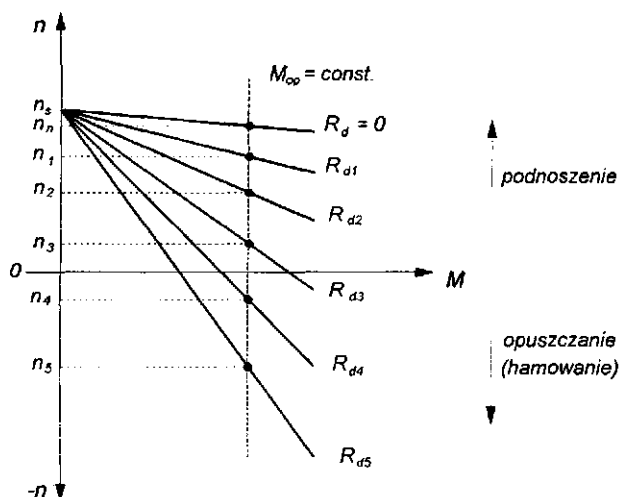




Rys. 8.17. Schemat blokowy przemiennika częstotliwości i charakterystyki mechaniczne silnika

### 8.3.4. Sposoby regulacji prędkości silników pierścieniowych

W silnikach pierścieniowych można stosować regulację prędkości przez **zmianę wartości napięcia lub częstotliwości** (jak w silnikach klatkowych) oraz **przez zmianę rezystancji w obwodzie wirnika** (zmianę poślizgu). Dwa pierwsze sposoby zostały omówione, a ostatni odpowiada rozruchowi za pomocą rozrusznika (rys. 8.11). Ten sposób nie jest ekonomiczny, gdyż na rezystancji  $R_j$  występują duże straty energii zamienionej na ciepło. Stosuje się go w niektórych rozwiązaniach napędów dźwignicowych. Na poszczególnych stopniach można uzyskać różne prędkości obrotowe w zakresie podnoszenia lub opuszczania ciężaru (rys. 8.18). Na rysunku należy zwrócić uwagę na stałą, niezależną od prędkości wartość momentu oporowego  $M_{op}$  - jest to charakterystyczną cechą napędów dźwignicowych.



Rys. 8.18. Charakterystyki mechaniczne silnika pierścieniowego przy regulacji za pomocą rezystorów wyłączonych do obwodu wirnika

## 8.4. Hamowanie silników asynchronicznych

Podobnie jak w silnikach prądu stałego, dla silników asynchronicznych można stosować hamowanie naturalne, mechaniczne i elektryczne. Dwa pierwsze sposoby są identyczne jak w maszynach prądu stałego (por. rozdz. 6.3), natomiast w hamowaniu elektrycznym pomimo takich samych określeń - hamowanie prądnicowe, przeciuprądem i dynamiczne, nieco inna jest zasada *działania*.

**Hamowanie prądnicowe** występuje przy rozpędzeniu układu powyżej prędkości synchronicznej  $n_s$  - silnik staje się wówczas prądnicą asynchroniczną, oddającą energię elektryczną do sieci. Hamowanie prądnicowe występuje w silnikach wielobiegowych przy przechodzeniu z większych obrotów na niższe oraz w układach dźwignicowych przy opuszczaniu ciężaru.

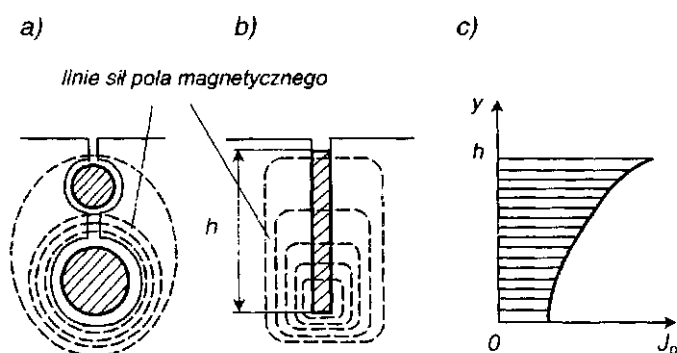
**Hamowanie przeciuprądem** zachodzi przy przełączeniu dwu dowolnych faz napięcia zasilającego (a więc przełączeniu silnika do pracy w odwrotnym kierunku) - silnik staje się wówczas hamulcem dla układu napędowego wirującego w przeciwnym kierunku. Niedogodnością tego rodzaju hamowania jest duży prąd pobierany przez silnik w czasie hamowania oraz konieczność szybkiego wyłączenia silnika przy prędkości zbliżającej się do zera dla uniknięcia rozruchu układu w przeciwnym kierunku.

**Hamowanie dynamiczne** (zwane inaczej hamowaniem prądem stałym) polega na tym, że uzwojenie stojana zostaje odłączone od sieci trójfazowej i przyłączone do źródła prądu stałego. Prąd stały wytwarza w stojanie nieruchome pole magnetyczne, które wzbudza SEM w wirujących prętach wirnika

i w konsekwencji przepływ prądu w zwartym uzwojeniu wirnika. Wywołuje to powstanie momentu skierowanego przeciwnie do kierunku ruchu.

## 8.5. Silniki asynchroniczne głębokożłobkowe i dwuklatkowe

Silniki asynchroniczne dwuklatkowe i głębokożłobkowe stosowane są w napędach wymagających zwiększonego momentu rozruchowego. Silniki dwuklatkowe mają podwójną klatkę wirnika (klatki są umieszczone współosiowo), zaś w silnikach głębokożłobkowych pręty klatki wirnika charakteryzują się wysokim i wąskim kształtem (rys. 8.19). Oba rodzaje silników wykorzystują to samo zjawisko i mają podobne właściwości ruchowe.

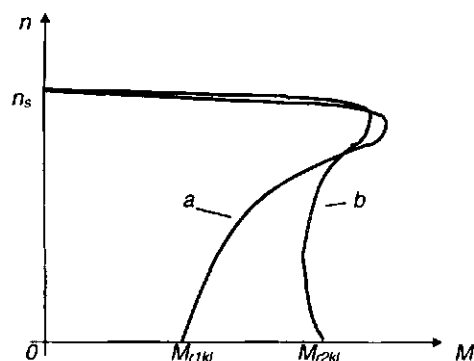


Rys. 8.19. Wirnik o powiększonej rezystancji rozruchowej:  
a) dwuklatkowy; b) głębokożłobkowy; c) rozkład gęstości prądu  $J_p$   
w przecię wirnika głębokożłobkowego ( $h$  - wysokość pręta)

Zastosowanie podwójnej klatki lub wysokich prętów w wirniku ma na celu powiększenie rezystancji rozruchowej, a tym samym momentu rozruchowego (na podobnej zasadzie jak włączanie rezystorów rozruchowych w obwód wirnika w silniku pierścieniowym).

W wirniku dwuklatkowym tzw. indukcyjność rozproszeniowa klatki zewnętrznej jest kilkakrotnie mniejsza niż indukcyjność klatki wewnętrznej. Jak widać na rys. 8.19 a, przeważająca część linii pola magnetycznego zamyka się dookoła prętów klatki wewnętrznej. W początkowym stadium rozruchu, gdy częstotliwość napięcia indukowanego w wirniku jest równa częstotliwości sieci (wzór 8.5), duża reaktancja rozproszeniowa klatki wewnętrznej ogranicza tak dalece prąd w jej prętach, że prawie cały prąd płynie przez klatkę zewnętrzną o dużej rezystancji. Pod koniec rozruchu częstotliwość napięcia w wirniku maleje do rzędu 1-2 Hz, reaktancja rozproszeniowa maleje i prąd wirnika rozdziela się na obie klatki, prawie proporcjonalnie do przekroju prętów.

Moment rozruchowy silników dwuklatkowych wynosi około 1,7-5-2 A/,, a prąd rozruchowy 4 -f- 5 /,,. Porównanie charakterystyk mechanicznych silnika jednoklatkowego i dwuklatkowego pokazano na rys. 8.20.

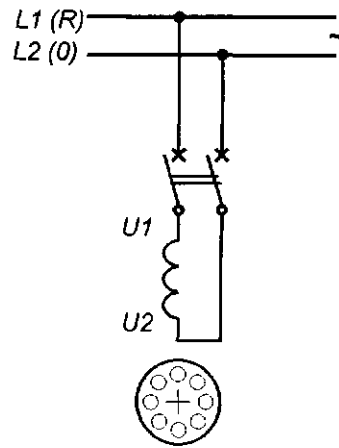


Rys. 8.20. Porównanie charakterystyk mechanicznych silników asynchronicznych: a) jednoklatkowego; b) dwuklatkowego

W silnikach głębokożłobkowych zachodzi podobne zjawisko nierównomiernego rozkładu linii sił pola magnetycznego (rys. 8.19 b), powodujące nierównomierną gęstość prądu  $J_p$  (stosunek natężenia prądu do powierzchni, przez którą on płynie) w chwili rozruchu (rys. 8.19 c), najmniejsza bliżej osi, największa bliżej obwodu wirnika, co ma podobne działanie jak podwójna klatka.

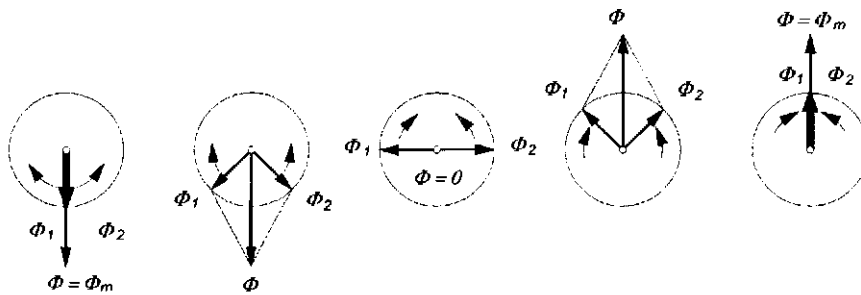
## 8.6. Silniki asynchroniczne jednofazowe

W wielu przypadkach kiedy dostępna jest tylko sieć jednofazowa (faza i przewód zerowy na łądzie lub dwie fazy na statku), dla potrzeb gospodarstwa domowego, warsztatów lub do celów „małej mechanizacji”, gdzie nie ma potrzeby stosowania silników trójfazowych, stosuje się małe silniki jednofazowe (najczęściej klatkowe) o tzw. mocy ułamkowej, czyli nie przekraczającej 1 kW. Są one zbudowane podobnie jak silniki trójfazowe. Na stojanie silnika umieszczone jest uzwojenie jednofazowe, które po zasileniu napięciem przemiennym wytwarza pulsujące pole magnetyczne. Takie pole nie zapewnia działania silnika, gdyż musi to być pole wirujące. Dlatego obok uzwojenia głównego umieszcza się tzw. uzwojenie rozruchowe. Układ połączeń silnika jednofazowego bez fazy rozruchowej pokazano na rys. 8.21.



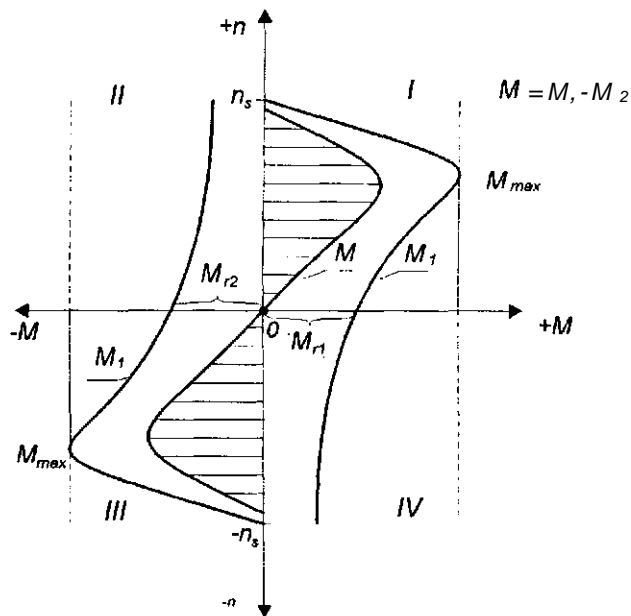
Rys. 8.21. Silnik jednofazowy bez fazy rozruchowej

Strumień pulsujący  $\Phi$ , jaki wytwarza uzwojenie jednofazowe można rozłożyć na dwa strumienie  $\Phi_1$  i  $\Phi_2$  wirujące w przeciwnych kierunkach. Każdy z tych strumieni wytwarza moment obrotowy, przy czym są one przeciwnie skierowane. Wytwarzanie pola pulsującego pokazano na rys. 8.22.



Rys. 8.22. Rozkład strumienia pulsującego  $\Phi$  na dwa strumienie wirujące w przeciwnych kierunkach  $\Phi_1$  i  $\Phi_2$

Ponieważ składowe momenty napędowe nie są sobie równe w całym zakresie zmian prędkości (z wyjątkiem  $n = 0$ ) ich suma daje wypadkowy moment obrotowy, który jest **momentem napędowym** silnika. Dla prędkości równej zero momenty rozruchowe od obu pól są równe i przeciwnie skierowane. Dlatego też moment wypadkowy również ma wartość zerową. Oznacza to, że silnik jednofazowy nie ma momentu rozruchowego i bez impulsu zewnętrznego sam nie ruszy, przy czym ruch nastąpi zgodnie z kierunkiem impulsu. Pokazano to na rys. 8.23.



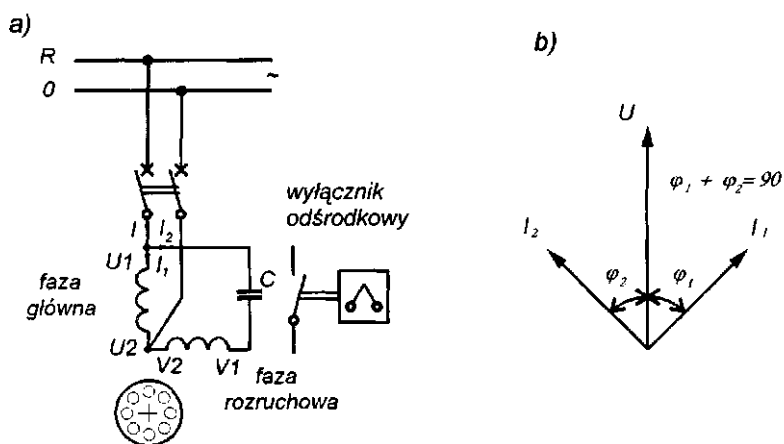
Rys. 8.23. Moment obrotowy silnika jednofazowego (bez fazy rozruchowej)

Jeżeli wirnikowi będzie nadana prędkość początkowa (np. impulsem mechanicznym w dowolnym kierunku), wówczas silnik zacznie się obracać aż do osiągnięcia punktu pracy ustalonej. Brak momentu rozruchowego jest wadą tych silników i w celu jej usunięcia zastosowano dodatkowe uzwojenie zwane **fazą rozruchową**. Uzwojenie podstawowe nazwano **fazą główną**. Obie te fazy dla maszyny dwubiegunowej są przesunięte w przestrzeni o kąt  $90^\circ$ . Aby uzyskać wirujące pole magnetyczne, prądy w tych uzwojeniach powinny być względem siebie przesunięte w fazie (również o kąt możliwie bliski  $90^\circ$ ). W celu spełnienia ostatniego warunku stosuje się dwa rozwiązania:

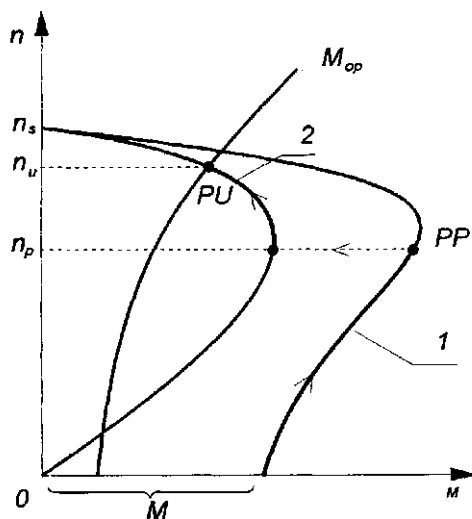
- 1) fazę rozruchową kondensatorową,
- 2) fazę rozruchową rezystancyjną.

W pierwszym przypadku faza rozruchowa połączona jest szeregowo z kondensatorem. Przez fazę główną płynie prąd  $i_1$  opóźniony względem napięcia o kąt  $\langle p_1$  (uzwojenie jako odbiornik ma charakter indukcyjny). Prąd  $i_2$  w fazie rozruchowej wyprzedza natomiast napięcie o kąt  $\langle p_2$  za sprawą odpowiednio dobranego kondensatora tak, że suma kątów  $(p_1 + \langle p_2)$  wynosi  $90^\circ$  (rys. 8.24 b). Ponieważ prądy  $i_1$  oraz  $i_2$  będą przesunięte w fazie o kąt  $90^\circ$ , to wytworzy się wirujący strumień magnetyczny i silnik będzie pracował tak, jak trójfazowy, a jego

charakterystyka mechaniczna będzie bardzo zbliżona do charakterystyki silnika trójfazowego.



Rys. 8.24. Silnik jednofazowy z fazą rozruchową kondensatorową: a) układ połączeń; b) wykres wskazowy prądów fazowych



Rys. 8.25. Charakterystyka mechaniczna jednofazowego silnika klatkowego z rezystancyjną fazą rozruchową

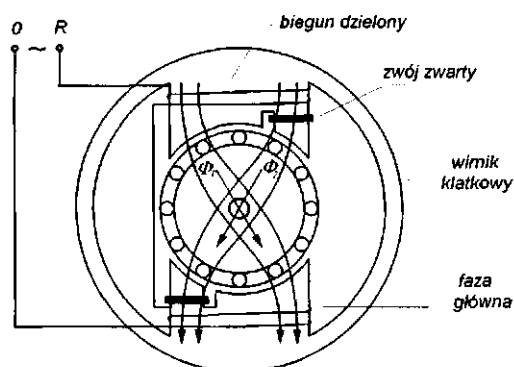
W drugim przypadku fazę rozruchową nawija się drutem rezystancyjnym, podobnym do przewodów używanych w elementach grzejnych, lecz izolowanym. Fazę tę włącza się tylko na czas rozruchu, po czym jest wyłączana za pomocą wyłącznika odśrodkowego (analogicznego jak na rys. 8.24 a).

Przesunięcie prądów występuje tutaj między prądem  $I_1$  i składową prądu  $I_2$  wyprzedzającą prąd  $I_1$  o kąt  $90^\circ$ . Przebieg rozruchu pokazano na rys. 8.25. Krzywa 1 jest to charakterystyka mechaniczna silnika z włączoną fazą rozruchową, a krzywa 2 - bez fazy rozruchowej po odłączeniu jej przez wyłącznik odśrodkowy w punkcie przełączenia oznaczonym na rysunku jako *PP*.

Faza rozruchowa jest zazwyczaj wyłączana po osiągnięciu przez silnik pewnej prędkości, gdyż uzwojenie rozruchowe jest już niepotrzebne (silnik ma już zdolność do wytwarzania momentu napędowego) a ponadto ze względów oszczędnościowych faza jest obliczana na krótki czas pracy. Wyłącznik odśrodkowy jest urządzeniem stosunkowo zawodnym i jeżeli faza rozruchowa nie zostanie odłączona, to w krótkim czasie nastąpi spalenie izolacji tej fazy lub całego silnika.

Silniki jednofazowe z fazą rozruchową rezystancyjną są często stosowane, szczególnie do napędu różnych urządzeń domowych.

Do grupy silników jednofazowych klatkowych należą też silniki z tzw. **biegunami dzielonymi**, zwane także silnikami ze zwojem zwartym. Bieguny są częściowo rozcięte, przy czym uzwojenie główne obejmuje cały biegun, a zwoje zwarte (lub pierścień) - tylko część wydzieloną rozcięciem (rys. 8.26). Obie części biegunów wytwarzają strumienie pulsujące, lecz przesunięte w fazie względem siebie. Ponieważ uzwojenia są przesunięte w przestrzeni, powstanie wypadkowy strumień wirujący i silnik ruszy, bowiem będzie miał moment rozruchowy.



Rys. 8.26. Szkic konstrukcji silnika z dzielonymi biegunami (ze zwojem zwartym)



Silniki z biegunami dzielonymi budowane są wyłącznie na niewielkie moce (do kilku watów), gdyż przy większych mocach w zwoju zwartym wydziela się dużo ciepła. Stosowane są do napędu małych urządzeń gospodarstwa domowego.

## 9. Transformatory

### 9.1. Zasada działania i stany pracy transformatora

#### 9.1.1. Rodzaje i budowa transformatorów

Transformator jest statycznym przetwornikiem energii elektrycznej wykorzystującym zjawisko indukcji elektromagnetycznej. Transformatory służą do przetwarzania energii elektrycznej prądu jednofazowego, jak i trójfazowego, stąd rozróżnia się **transformatory jednofazowe i trójfazowe**. Transformatory ze względu na przeznaczenie dzielą się na transformatory **energetyczne i specjalne**.

Transformatory energetyczne wykorzystuje się przy przesyłaniu energii elektrycznej w systemie energetycznym. Są to przeważnie transformatory trójfazowe dużej mocy. Transformatory specjalne stosuje się w obwodach pomocniczych, takich jak obwody pomiarowe, sygnalizacyjne, zabezpieczające (są to przeważnie transformatory jednofazowe o niewielkiej mocy) oraz w specjalnych obwodach odbiorczych zasilających urządzenia spawalnicze, prostownikowe itp.

Podstawowymi elementami każdego transformatora są jego uzwojenia i rdzeń. Rdzeń jest wykonywany w postaci pakietu blach z miękkiej stali nakrzemionej odizolowanych od siebie - taka konstrukcja pozwala na zmniejszenie strat mocy w rdzeniu. Do wykonania uzwojeń stosuje się na ogół izolowane przewody miedziane.

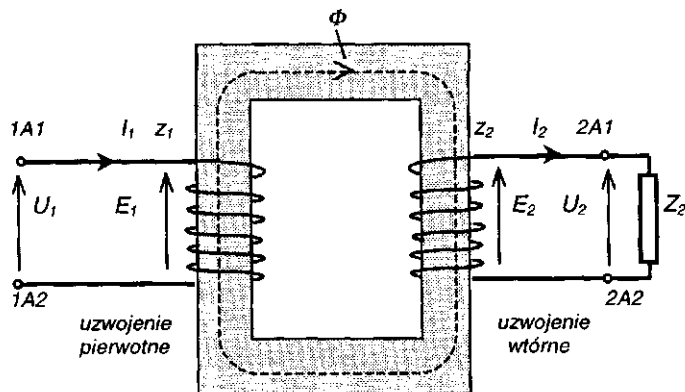
Straty mocy w transformatorze w czasie jego pracy uwidaczniają się w postaci ciepła nagrzewającego transformator. Transformatory o niewielkiej mocy (w tym również transformatory energetyczne stosowane na statkach) mają naturalne chłodzenie powietrzne, transformatory wielkich mocy są chłodzone olejem.

#### 9.1.2. Przekładnia transformatora

Na rysunku 9.1 przedstawiono transformator jednofazowy, którego uzwojenie pierwotne ma  $z_1$  zwojów, a wtórne -  $z_2$  zwojów. Jeżeli uzwojenie pierwotne transformatora jest zasilane napięciem przemiennym ( $U_1$ ), to w uzwojeniu tym popłynie prąd  $I_1$ , powodujący powstanie strumienia magnetycznego  $\Phi$ .

Jeżeli napięcie  $U$  ma przebieg sinusoidalny, to strumień  $\Phi$  ma również przebieg sinusoidalny:

$$\Phi = \Phi_{\max} \sin \omega t$$



Rys. 9.1. Transformator jednofazowy

Strumień indukuje w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym siły elektromotoryczne  $E_1$  i  $E_2$  wynoszące odpowiednio:

- w uzwojeniu pierwotnym:

$$e_1 = -z_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{czyli} \quad e_1 = z_1 \cdot 2\pi f \cdot \Phi_{\max} \cos \omega t \quad (9.1)$$

w uzwojeniu wtórnym:

$$e_2 = -z_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{czyli} \quad e_2 = z_2 \cdot 2\pi f \cdot \Phi_{\max} \cos \omega t \quad (9.2)$$

gdzie:

- $z_1, z_2$  – ilość zwojów uzwojenia pierwotnego i wtórnego,
- $\omega = 2\pi f$ ,
- $f$  – częstotliwość napięcia zasilającego.

Amplitudy tych sił wynoszą:

$$E_{1\max} = 2\pi z_1 f \Phi_{\max} \quad \text{i} \quad E_{2\max} = 2\pi z_2 f \Phi_{\max} \quad (9.3)$$

# r

a ich wartości skuteczne są równe:

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} z_1 f \Phi_{\max} \quad \text{i} \quad E_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} z_2 f \Phi_{\max} \quad (9.4)$$

Stosunek tych sił jest nazywany **przekładnią transformatora** \$:

$$\vartheta_u = \frac{E_1}{E_2} = \frac{z_1}{z_2}$$

W stanie jałowym transformatora (gdy prąd  $I_2 = 0$ , a prąd  $I_1$  jest niewielki) zachodzą (w przybliżeniu) równości  $E_1 \sim U_1$  i  $E_2 \sim U_2$  i można przyjąć dla tego stanu:

$$\vartheta_u = \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{z_1}{z_2} \quad (9.6)$$

**Wielkość  $\vartheta_u$  nazywamy przekładnią napięciową transformatora.**

### 9.1.3. Stany pracy transformatora

**Stan jałowy** - transformator jest nieobciążony (prąd  $I_2 = 0$ ,  $U_2 = E_2 = U_{20}$ ). Prąd w uzwojeniu pierwotnym  $I_1$  wynosi zwykle ok. 5 - 10% prądu znamionowego  $I_{1N}$  (przy pełnym obciążeniu). Próby stanu jałowego pozwalają określić przekładnię napięciową, oraz straty w rdzeniu transformatora (straty w żelazie)

*-Pfe.*

**Stan obciążenia** — transformator obciążony jest impedancją  $Z_2$ , w uzwojeniu wtórnym płynie prąd  $I_2$  a napięcie na jego zaciskach wynosi  $U_2 \sim E_2$ . Można przyjąć (w dużym przybliżeniu), że moc pozorną  $S_1$  pobierana przez transformator jest równa mocy  $S_2$  oddawanej przez transformator. Założenie zakłada pomijalność strat w transformatorze, co przy sprawności transformatorów przekraczającej znacznie 90% jest możliwe do przyjęcia. Tak więc:

$$S_1 \approx S_2$$

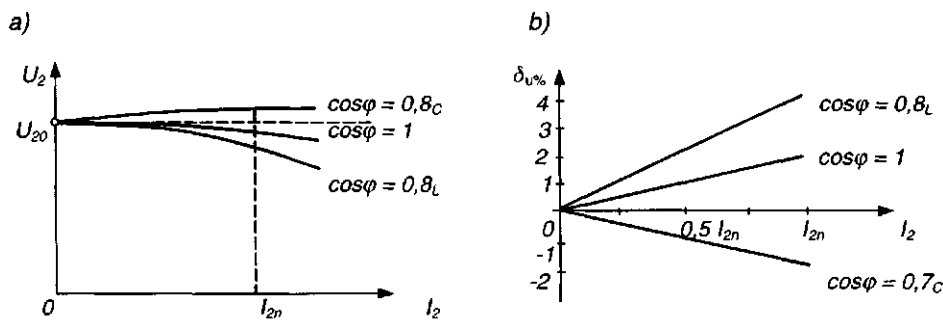
$$I_1 \cdot U_1 \approx I_2 \cdot U_2$$

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{U_2}{U_1}$$

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{z_2}{z_1} \approx \frac{1}{\vartheta_u} \quad (9.7)$$

W próbach stanu obciążenia określa się m.in. **zmienność napięcia**  $\delta_u\%$  oraz wyznacza się **charakterystykę obciążenia**  $t_2 = U_2 / I_2$  (rys. 9.2). Należy pamiętać, że transformator zasila obwody prądu zmiennego a zmiany napięcia wtórnego transformatora przy obciążeniu zależą również od charakteru obciążenia, stąd różne charakterystyki, przy różnych współczynnikach mocy odbioru. Zmienność napięcia jest określona wzorem:

$$\delta_{u\%} = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} 100\% \quad (9.8)$$



Rys. 9.2. Charakterystyki transformatora: a) charakterystyka obciążenia; b) zależność zmienności napięcia od obciążenia

**Stan zwarcia awaryjnego** - transformator jest zasilany napięciem znamionowym  $U_{1N}$ , uzwojenie wtórne jest zwarte ( $Z_2 = 0$ ,  $U_2 = 0$ ), a w uzwojeniach płyną prądy wielokrotnie większe od znamionowych i powodują w krótkim czasie zniszczenie transformatora. W próbach laboratoryjnych lub warsztatowych wykonuje się **stan zwarcia pomiarowego** (przy zasilaniu zwartego transformatora bardzo niskim napięciem  $U_z$  przy którym  $I^{\wedge} = I_{1N}$ ), służący do określenia tzw. **procentowego napięcia zwarcia**  $u_z\%$  oraz strat w uzwojeniach (straty w miedzi)  $P_{Cu}'$

$$u_{z\%} = \frac{U_z}{U_{1N}} 100\% \quad (9.9)$$

Od napięcia tego zależy wartość prądu zwarcia awaryjnego, gdyż:

$$I_{1z} = \frac{100\%}{u_z\%} I_{1N} \quad (9.10)$$

Napięcie zwarcia wynosi zwykle od kilku do kilkunastu procent, przy czym jest większe dla transformatorów dużej mocy. I tak np. dla transformatora o napięciu zwarcia  $u_z\% = 5\%$  prąd zwarcia awaryjnego będzie 20-krotnie większy od prądu znamionowego i w krótkim czasie może spowodować przepalenie uzwojeń.

Wyznaczenie procentowego napięcia zwarcia pozwala zatem na prognozowanie parametrów rzeczywistego stanu zwarcia i odpowiedniego zaprojektowania zabezpieczeń zwarciovych transformatora.

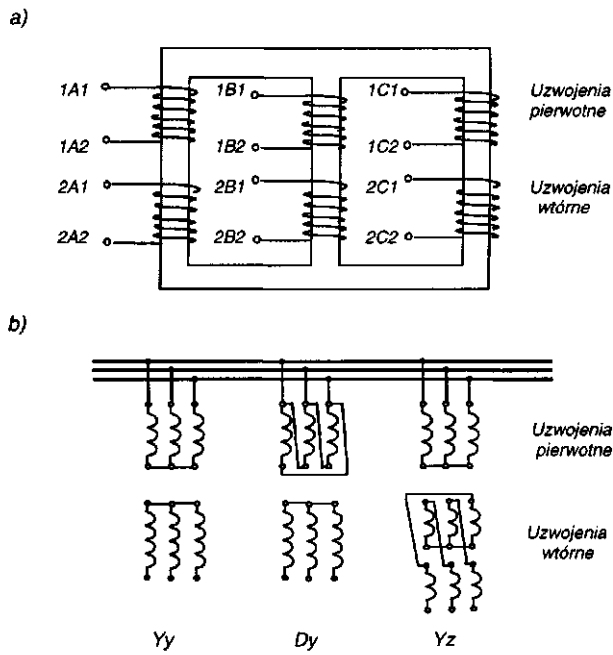
## 9.2. Transformatory trójfazowe

### 9.2.1. Połączenia uzwojeń transformatorów trójfazowych

W układach trójfazowych do transformacji napięć stosuje się transformatory trójfazowe lub (w przypadkach najwyższych mocy) trzy transformatory jednofazowe odpowiednio połączone. Uzwojenia transformatorów trójfazowych są łączone na różne sposoby, w zależności od przeznaczenia transformatora. Uzwojenia pierwotne łączy się w gwiazdę (Y) lub trójkąt (D), uzwojenia wtórne - w gwiazdę (y), trójkąt (d) lub zygzak (z). Połączenia w trójkąt i w zygzak stosuje się przy obciążeniach niesymetrycznych ze względu na symetryzujące właściwości tych połączeń. Szkic uzwojeń transformatora trójfazowego oraz sposoby łączeń pokazuje rys. 9.3.

Oprócz oznaczeń literowych, układ połączeń określa się jeszcze cyfrą arabską, oznaczającą przesunięcie kątowe (mierzone w jednostkach tzw. kąta godzinowego, gdzie 1 godzina =  $30^\circ$ ) pomiędzy jednoimiennymi napięciami międzyprzewodowymi lub fazowymi strony pierwotnej i wtórnej. Najczęściej używa się połączeń Yy0, Dy5, Yd5, Yz5, Dyl1, Ydl1 i Yzl1.

Przekładnią transformatora trójfazowego nazywamy stosunek napięć międzyprzewodowych pierwotnego  $U^{\wedge}$  i wtórniego  $t/20$  w stanie jałowym.



Rys. 9.3. Transformatory trójfazowe: a) oznaczenia uzwojeń; b) sposoby łączenia uzwojeń

Przy jednakowym połączeniu uzwojeń (o ilości zwojów  $z_1$  i  $z_2$ ), np. Yy, Dd przekładnia  $u$  jest równa:

$$\vartheta_u = \frac{U_{10}}{U_{20}} = \frac{z_1}{z_2} \quad (9-11)$$

a przy połączeniach mieszanych, np. Yz, Dy:

$$\vartheta_u = \frac{U_{10}}{U_{20}} = k \frac{z_1}{z_2} \quad (9.12)$$

gdzie  $k$  jest współczynnikiem, którego wartość zależy od grupy połączeń. Jego wartość jest określana według poniższej tabeli:

Układ połączeń	Dy	Dz	Yz	Yd
$k$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{\sqrt{3}}$	$\sqrt{3}$

## 9.2.2. Praca równoległa transformatorów

W warunkach eksploatacyjnych transformatory bardzo często są łączone równolegle, np. w przypadku gdy moc pojedynczego transformatora jest mniejsza niż moc zapotrzebowana przez odbiory. Stan, w którym uzwojenia pierwotne dwu lub kilku transformatorów zasilane są ze wspólnych szyn, a strony wtórne tych transformatorów zasilają odbiory również przez wspólne szyny nazywamy pracą równoległą na szyny zbiorcze (z taką sytuacją mamy do czynienia na statkach). Jeżeli pomiędzy transformatorami pracującymi równolegle zawarte są rozległe odcinki sieci, to układ taki nazywamy pracą równoległą na sieć. Poprawna praca równoległa (brak prądów wyrównawczych płynących między transformatorami) jest możliwa tylko wówczas, gdy zachowana jest równość wartości chwilowych napięć wtórnych. Jest to zrealizowane tylko wtedy, gdy spełnione są następujące warunki:

- równość przekładni napięciowych obu transformatorów  $z^1 = z^2$  (zapewnia to równość wartości napięć pierwotnych i wtórnych); dopuszczalna odchyłka wynosi  $\pm 0,5\%$ ;
- równość napięć zwarcia  $u_{z\%1} = u_{z\%2}$  (zapewnia to takie samo nachylenie charakterystyk obciążenia i równomierne, proporcjonalnie do ich mocy, obciążenie obu transformatorów); dopuszczalna odchyłka wynosi  $\pm 10\%$ ;
- zgodność grup połączeń w przypadku pracy równoległej transformatorów trójfazowych (zapewnia to zgodność w fazie napięć wtórnych obu transformatorów);
- moce współpracujących transformatorów są zbliżone; dopuszczalny stosunek mocy nie większy od 1:3 (zapewnia to zgodność w fazie prądów w uzwojeniach wtórnych transformatorów).

## 9.3. Transformatory pomiarowe (przekładniki)

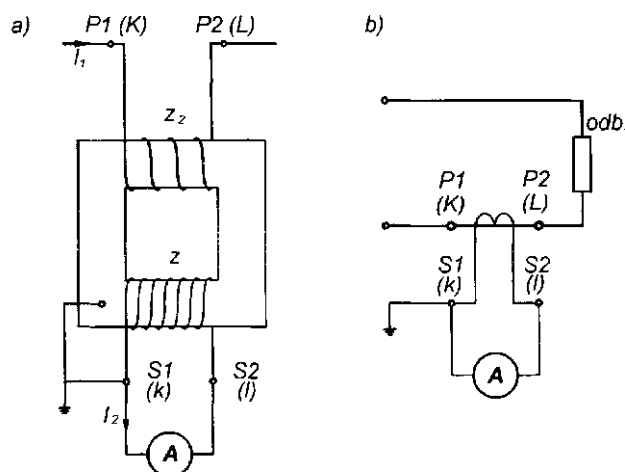
Transformatory pomiarowe zwane potocznie przekładni i karni są to jednofazowe transformatory napięciowe i prądowe, służące do rozszerzenia zakresów pomiarowych przyrządów pomiarowych prądu przemiennego oraz przekaźników zabezpieczających. Przekładniki umożliwiają:

- galwaniczne oddzielenie obwodu pomiarowego od sieci energetycznej;
- stosowanie jednakowych przyrządów pomiarowych lub zabezpieczeniowych przy różnych parametrach roboczych w układzie energetycznym przez unifikację sygnału pomiarowego strony wtórnej przekładni-ków;



- uzyskanie odpowiedniej przekładni napięciowej lub prądowej;
- ochronę przyrządów pomiarowych przed zakłócającym działaniem sieci oraz stworzenie bezpieczniejszych warunków obsługi.

**Przekładniki prądowe** są transformatorami jednofazowymi, w których prąd uzwojenia pierwotnego jest wymuszony pracą obwodu energetycznego (prądem w tym obwodzie). Sposób połączenia przekładnika prądowego pokazano na rys. 9.4.



Rys. 9.4. Przekładnik prądowy: a) układ połączeń; b) schemat uproszczony

Przekładnik prądowy jest transformatorem, w którym stan pracy jest zbliżony do stanu zwarcia (oporność obciążenia jest bardzo mała). Dla obwodów przekładnika słuszna jest zależność:

$$I_1 z_1 \approx I_2 z_2 \quad (9.13)$$

stąd:

$$I_1 \approx \frac{z_2}{z_1} I_2 = \frac{1}{\theta''} I_2 \quad (9.14)$$

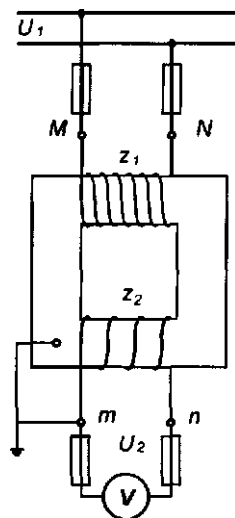
Przekładniki prądowe buduje się najczęściej na prądy znamionowe pierwotne od 5 -s- 4000 A, a wtórne - 1, 2 i 5 A. Mają one też **klasy dokładności** jak inne przyrządy pomiarowe, np.: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 3. Litera „P” umieszczona na

przekładniku oznacza, że nadaje się on do obwodów zabezpieczeń (*protection*). W czasie eksploatacji należy pamiętać, że:

- strona wtórna powinna być uziemiona (rys. 9.4);
- w czasie pracy przekładnika (tzn. kiedy płynie prąd) obwód wtórny musi być zwarty lub obciążony (np. cewką amperomierza), gdyż w przeciwnym wypadku na zaciskach obwodu wtórnego wystąpi napięcie grożące porażeniem obsługi.

Obecnie są stosowane oznaczenia  $P1$  i  $P2$  zacisków strony pierwotnej (spotykane są jeszcze stare oznaczenia  $K$  i  $L$ ), a strony wtórnej  $S1$  i  $S2$  (lub  $k$  i  $l$ ). Należy pamiętać, że jeżeli w danej chwili w uzwojeniu pierwotnym prąd płynie od zacisku  $P1$  do  $P2$ , to w uzwojeniu wtórnym (w obwodzie zewnętrznym) również od  $S1$  do  $S2$ ,

**Przekładniki napięciowe** są transformatorami jednofazowymi lub trójfazowymi. Do strony wtórnej tych przekładników podłącza się urządzenia o dużej impedancji, takie jak: cewki woltomierzy, cewki napięciowe watomierzy lub liczników energii elektrycznej czy cewki przekaźników napięciowych. Duża impedancja obciążenia sprawia, że stan pracy przekładnika napięciowego jest bliski stanowi jałowemu. Przykład połączenia przekładnika jednofazowego pokazano na rys. 9.5.



Rys. 9.5. Schemat przyłączenia woltomierza do sieci wysokiego napięcia za pośrednictwem przekładnika napięciowego

Ze względu na stan pracy zbliżony do stanu jałowego słuszną jest zależność na przekładnię napięciową transformatora:

$$\vartheta_u = \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{z_1}{z_2}$$

stąd:

$$U_1 = \vartheta_u \cdot U_2 \quad (9.15)$$

Stronę wtórną przekładników napięciowych buduje się najczęściej na napięciu  $C/2_n = 100$  V. Celem stosowania przekładników napięciowych (podobnie jak prądowych) jest:

- galwaniczne oddzielenie obwodu pomiarowego od sieci energetycznej;
- unifikacja sygnału pomiarowego po stronie wtórnej przekładnika;
- uzyskanie odpowiedniej przekładni napięciowej.

Podczas eksploatacji przekładników napięciowych należy pamiętać, że:

- nie wolno zwierać ani nadmiernie obciążać strony wtórnej;
- do strony wtórnej można podłączać tylko urządzenia o dużej impedancji takie jak: cewki napięciowe mierników i przekaźników.

Zaciski uzwojenia pierwotnego przekładników napięciowych oznacza się  $M$  i  $N$ , a uzwojenia wtórnego -  $min$ . Jeżeli w danej chwili po stronie pierwotnej potencjał punktu  $M$  jest wyższy niż punktu  $N$  ( $V_M > V_N$ ), to po stronie wtórnej również  $V_m > V_n$ .

## 9.4. Autotransformatory

Szczególnym rozwiązaniem transformatora jest **transformator jedno-uzwojeniowy (autotransformator)**, w którym uzwojenie pierwotne zostało podzielone na dwie części. Uzwojenie wtórne jest częścią uzwojenia pierwotnego (rys. 9.6).

Autotransformatory mogą służyć zarówno do obniżania, jak i podnoszenia napięcia. Wykonywane są jako jednofazowe i trójfazowe.

Jeżeli pominiemy prąd jałowy, straty mocy i strumienie rozproszenia, to zarówno napięcia  $U_1$  i  $C/2$ , jak i prądy  $I_1$  i  $I_2$  będą ze sobą w fazie. Przy tych założeniach tzw. moc przechodnia autotransformatora wyraża się zależnością:

$$S = S_1 \approx S_2 \quad (9.16) \text{ przekładnia}$$

autotransformatora jest równa:

$$\vartheta_u \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{z_1}{z_2} \quad (9.17)$$

a przepływy w uzwojeniach wynoszą:

$$I_1 \cdot z_1 \approx I_2 \cdot z_2 \quad (9.18)$$

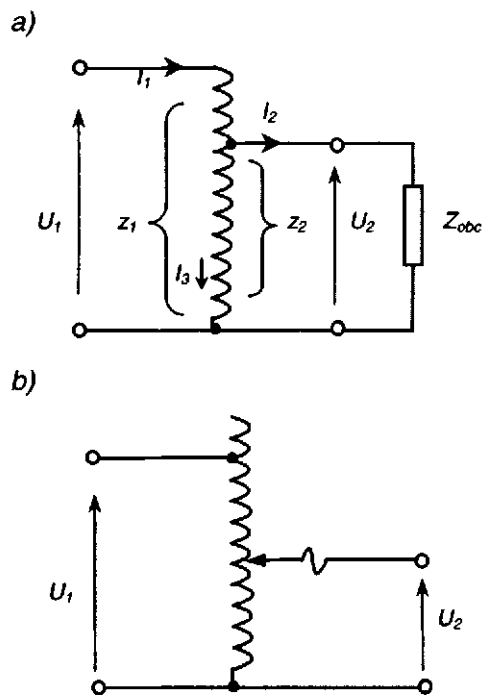
zatem:

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{z_2}{z_1} \quad (9.19)$$

Prąd we wspólnej części uzwojenia jest równy:

$$I_3 = I_1 - I_2 \quad (9.20)$$

Prąd ten jest niewielki, jeżeli przekładnia jest bliska jedności i wówczas wspólna część uzwojenia może być wykonana cieńszym przewodem.



Rys. 9.6. Autotransformatory: a) autotransformator z odczepem stałym; b) autotransformator regulowany

Podstawową zaletą autotransformatorów jest to, że mają dwukrotnie mniej uzwojeń od transformatorów zwykłych, a więc są od nich lżejsze i mniejsze. Do wad należy przede wszystkim połączenie galwaniczne obwodów pierwotnego i wtórnego (co stwarza, przy przerwaniu uzwojenia, możliwość pojawienia się napięcia pierwotnego w obwodzie wtórnym) oraz niewielka wytrzymałość na zwarcia.

W elektroenergetyce autotransformatory służą do sprzęgania sieci wysokiego napięcia o mało różniących się napięciach, a w przemyśle stosuje się je do rozruchu niektórych silników.

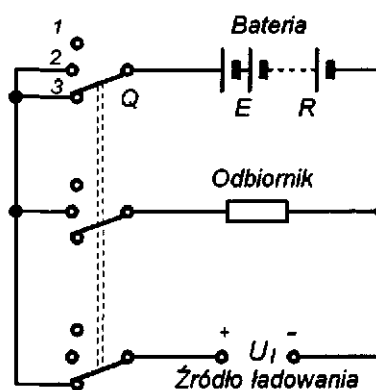
W laboratoriach i warsztatach autotransformatory o zmiennej przekładni (rys. 9.6 b) znalazły zastosowanie do płynnej regulacji napięcia.

## 10. Akumulatory

### 10.1. Budowa i zasada działania akumulatora

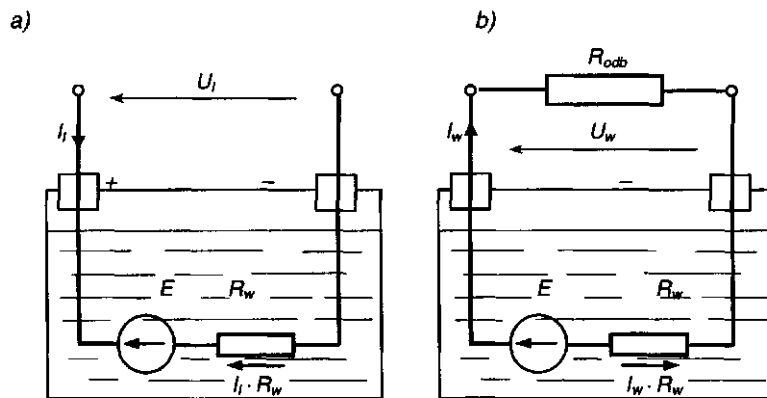
Jednym z podstawowych źródeł energii elektrycznej na statkach są urządzenia wytwarzające napięcia na zasadzie przemiany elektrochemicznej. Rozróżniamy urządzenia mogące jednorazowo oddać energię zawartą w chemicznych komponentach i nazywamy je **bateriami suchymi**. Takie baterie są powszechnie stosowane do przyrządów pomiarowych oraz do środków ratunkowych. W tym ostatnim przypadku bateria uruchamia się pod wpływem działania wody (np. w kamizelkach ratunkowych). Te baterie budowane są najczęściej na 1,5V, 4,5V i 9V.

Drugim typem są urządzenia mające zdolność odwracalnej przemiany elektrochemicznej, tzn. można je ładować dostarczając energię elektryczną, a następnie rozładować wykorzystując uprzednio zgromadzoną energię. Ten typ urządzeń nazywamy **akumulatorami**. Zdolność akumulatorów do utrzymania w dłuższym okresie czasu odpowiednio dużej energii elektrycznej, przy w miarę stabilnym napięciu, spowodowało, że są one niezastąpionym źródłem energii na każdym statku. Zasada pracy baterii akumulatorów została pokazana na rys. 10.1.



Rys. 10.1. Zasada pracy baterii akumulatorów. Położenia wyłącznika  $Q$ : 1 - wyłączone, 2 - rozładowanie, 3 - ładowanie

W trakcie **ładowania** akumulatora (rys. 10.2) dostarczamy energię elektryczną prądu stałego o napięciu większym od siły elektromotorycznej akumulatora w celu wymuszenia przepływu prądu elektrycznego.



Rys. 10.2. Ładowanie (a) i rozładowanie (b) akumulatora

Zależności w obwodzie ładowania akumulatora określa równanie:

$$U_l = E + I_l \cdot R_w \quad (10.1)$$

gdzie  $E$  - siła elektromotoryczna akumulatora [V],  
 $I_l$  - prąd ładowania [A],  
 $R_w$  - rezystancja wewnętrzna akumulatora [Q],  
 $U_l$  - napięcie źródła ładowania [V].

W czasie **rozładowania**, tzn. pobierania energii elektrycznej z akumulatora, napięcie na jego zaciskach będzie mniejsze od SEM:

$$U_w = E - I_w \cdot R_w \quad (10.2)$$

gdzie:

$U_w$  - napięcie w czasie rozładowania [V],  
 $I_w$  - prąd wyładowania [A].

Akumulator jest  
 charakteryzowany

przez szereg parametrów, z których najważniejszymi są:

- **siła elektromotoryczna**  $E$  - podawana w V na ogniwo,
- **rezystancja wewnętrzna**  $R_w$  - podawana w Q na ogniwo,

- **pojemność akumulatora**  $Q_{el}$  - określana ilością ładunku elektrycznego możliwą do otrzymania z naładowanego akumulatora w czasie wyładowania  $t_w$  [h]:

$$Q_{el} = I_w \cdot t_w \quad [\text{A} \cdot \text{h}] \quad (10.3)$$

Ponieważ pojemność akumulatora jest różna dla różnych wielkości prądu wyładowania, w katalogach jest podawana **pojemność dziesięciogodzinna**  $Q_{10}$  dla prądu przyjmowanego jako **znamionowy prąd wyładowania**  $I_{10}$ ,

**Sprawność akumulatorów** podobnie jak we wszystkich urządzeniach technicznych wiąże się ze stratami energii w czasie pracy. Wyróżniamy dwie sprawności akumulatorów:

**sprawność elektryczna** - stosunek ładunków elektrycznych wprowadzonego do akumulatora w czasie ładowania ( $I_l \cdot t_l$ ) i pobranego w czasie wyładowania ( $I_w \cdot t_w$ ):

$$\eta_{el} = \frac{I_w \cdot t_w}{I_l \cdot t_l} \cdot 100 \quad [\%] \quad (10.4)$$

**sprawność energetyczna** - stosunek energii elektrycznej wprowadzonej do akumulatora w czasie ładowania i pobranej w czasie wyładowania:

$$\eta_{en} = \frac{U_w \cdot I_w \cdot t_w}{U_l \cdot I_l \cdot t_l} \cdot 100 \quad [\%] \quad (10.5)$$

Ogniwa akumulatorowe są łączone szeregowo (dla uzyskania potrzebnego napięcia) i równolegle (dla zwiększenia pojemności, a tym samym prądu znamionowego) w baterie. Wytwórcy podają w danych katalogowych wspomniane wyżej parametry w odniesieniu do całej baterii.

Akumulatory stosowane do zasilania rozruszników silników spalinowych nazywamy **akumulatorami rozruchowymi**. Charakteryzują się one krótkim czasem pracy, przy obciążeniu znacznie przekraczającym prąd znamionowy.

Akumulatory używane do zasilania silników napędowych wózków transportowych lub urządzeń elektrycznych, np. w przypadku zaniku napięcia w sieci energetycznej nazywamy **akumulatorami trakcyjnymi, stacyjnymi lub energetycznymi**. Charakteryzują się one tym, że w czasie rozładowania są obciążone prądem zbliżonym do wartości znamionowej. Czas pracy akumulatorów energetycznych może wynosić do kilkunastu godzin.



Zasada budowy większości akumulatorów jest podobna. Podstawowe elementy akumulatora to:

- płyty o potencjale dodatnim,
- płyty o potencjale ujemnym,
- przekładki separacyjne z perforowanego materiału izolacyjnego,
- elektrolit.

Ze względu na rodzaj elektrolitu rozróżniamy **akumulatory kwasowe i zasadowe**.

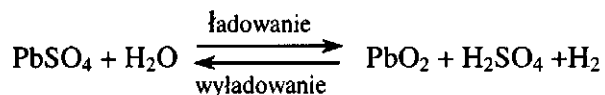
## 10.2. Akumulatory kwasowe

Podstawowymi elementami budowy akumulatora kwasowego (zwanego również akumulatorem ołowiowym) są:

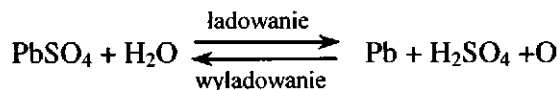
- płyty ujemne wykonane z ołowiu wapniowego **PbCa** lub ołowiu Pb z dodatkiem antymonu;
- płyty dodatnie wykonane z tlenku ołowiu **PbO<sub>2</sub>**;
- elektrolit, roztwór wodny kwasu siarkowego **H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>** chemicznie czysty (akumulatorowy) o gęstości (w stanie naładowanym przy temperaturze 20-25°C) 1,25 - 1,28 g/cm<sup>3</sup> w zależności od technologii wykonania i producenta.

W akumulatorze w czasie ładowania i rozładowania zachodzą następujące procesy (w uproszczeniu):

płyta dodatnia



płyta ujemna



Łatwo zauważyć, że w czasie rozładowania akumulatorów kwasowych siarka i tlen łączą się z czynną masą płyt a cząstki wody H<sub>2</sub>O uwalniane są od elektrolitu, a zatem jego gęstość maleje. Umożliwia to określenie stopnia naładowania akumulatora na podstawie gęstości elektrolitu.

Zależność ta przedstawia się następująco:

Gęstość elektrolitu $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1,28	1,24	1,19	1,14	1,1
Stopień naładowania akumulatora [%]	100	75	50	25	0

**Siła elektromotoryczna  $E$**  akumulatorów kwasowych zależy od gęstości elektrolitu. Z wy starczającą dokładność i a można przyjąć zależność:

$$E = \rho + 0,85 \text{ [V]} \quad (10.6) \text{ gdzie } \rho - \text{gęstość}$$

elektrolitu [g/cm<sup>3</sup>].

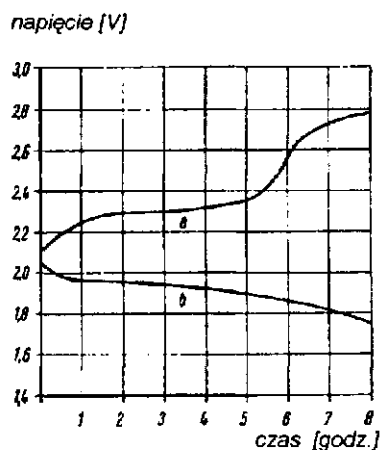
Na przykład przy naładowanym akumulatorze, gdy  $\rho = 1,28 \text{ g/cm}^3$ :

$$E = 1,28 + 0,85 = 2,13 \text{ V}$$

Jeżeli uwzględni się zmieniającą gęstość elektrolitu  $\rho$  w czasie pracy akumulatora, a w konsekwencji również zmianę siły elektromotorycznej  $E$  oraz spadek napięcia na rezystancji  $R_w$ , to napięcie  $U$  na zaciskach będzie zmieniało się według zależności:

$$U_l = E + I_l \cdot R_w = \rho + 0,85 + I_l \cdot R_w \text{ [V]} \quad (10.7)$$

$$U_w = E - I_w \cdot R_w = \rho + 0,85 - I_w \cdot R_w \text{ [V]} \quad (10.8)$$



Rys. 10.3. Zależność napięcia akumulatora od czasu pracy przy  $I = 0,1 \cdot Q_{n10}$  [A]:  
a) ładowanie; b) wyładowanie

Pomiar napięcia na zaciskach odbiega jednak od wartości obliczonej według wzorów (10.7, 10.8) ze względu na dodatkowe zjawiska zachodzące w akumulatorze w czasie reakcji chemicznej.

Zmienność napięcia w czasie ładowania i wyładowania przedstawia rys. 10.7

$E_n = 2,1 \text{ V}$  i  $U_n = 2,0 \text{ V}$  ogniwo akumulatorów kwasowych przyjmuje się:

Rezystancja wewnętrzna akumulatorów kwasowych zależy od konstrukcji akumulatora, temperatury elektrolitu oraz stanu pracy (w czasie wyładowania akumulatora rezystancja wzrasta). Dla akumulatorów kwasowych rezystancja wewnętrzna waha się od 0,002 do 0,01  $\Omega$ /ogniwo. Rezystancję wewnętrzną trzeba uwzględniać szczególnie w czasie wyładowania dużym prądem (np. w akumulatorach rozruchowych).

**Ładowanie akumulatorów** należy dokonywać prądem o wartości zależnej od ich pojemności. Zalecane jest, żeby natężenie prądu ładowania wynosiło:

$$I_l \leq 0,1 \cdot Q_{n10} \text{ [A]}$$

Dobre wyniki ładowania uzyskuje się przy zmiennej wartości prądu ładowania, początkowo większym, a pod koniec ładowania zmniejszonym. Może to być zrealizowane **ładowaniem dwustopniowym**: w którym akumulator ładuje się prądem:

do czasu intensywnego gazowania i wzrostu napięcia 1.  $I_l = 0,1 \cdot Q_{n10}$  –  
do  $U_i = 2,4 \text{ V}$ , po czym przełącza się na 2.  $I_l = 0,05 \cdot Q_{n10}$  – uuje się  
ładowanie zmniejszonym prądem do wystąpienia  
ponownie intensywnego gazowania i wzrostu napięcia do ok. 2,7 V.

Stan naładowania akumulatora określa się mierząc areometrem gęstość elektrolitu.

Źródło napięcia stałego służące do ładowania akumulatorów kwasowych powinno posiadać napięcie wystarczające do wytworzenia żądanego natężenia prądu. Wartość ta powinna wynosić 2,4 + 2,8 V na ogniwo.

W czasie ładowania i wyładowania w akumulatorach otwartych następuje wyparowanie wody z elektrolitu. Należy ciągle kontrolować jego poziom, który powinien wynosić ok. 1 cm ponad płytami, a w obudowie przezroczystej według zaznaczonego poziomu.

Elektrolit uzupełnia się **wodą destylowaną** lub **demineralizowaną**. Nie wolno uzupełniać elektrolitu kwasem ani wodą innego rodzaju (mineralną,

deszczową, przegotowaną itp.), gdyż powoduje to nieodwracalne zniszczenie akumulatora.

**Samowyladowanie** akumulatorów polega na wewnętrznym przepływie prądu pomiędzy płytami o różnych biegunach. Powoduje to stopniową utratę pojemności nieobciążonego akumulatora.

Przepisy PRS w części VI-12.1.1 określają dopuszczalną maksymalną wartość samo wyładowania  $\Delta Q \leq 0,01 \cdot Q$  [Ah na dobę] przy temperaturze  $25 \pm 5^\circ\text{C}$ , tzn., że dopuszczalna wartość ubytku pojemności wynosi:

Jeżeli chcemy utrzymać baterię akumulatorów w gotowości z pełną pojemnością, to należy zastosować ciągłe podładowywanie, tzw. **ładowanie buforowe**. Do tego celu stosuje się napięcie  $U_M = 2,20 \text{ V/ogniwo}$ , co spowoduje ciągłe podładowanie prądem  $I_M = (0,2 - 1) \text{ mA/Ah}$  w zależności od stanu technicznego akumulatorów.

### 10.3. Akumulatory zasadowe

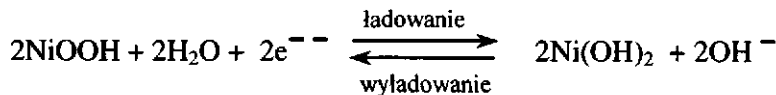
W akumulatorach zasadowych jako elektrolitu używa się zasady - roztworu wodnego wodorotlenku potasu. W powszechnym użytkowaniu znajdują się dwa rodzaje akumulatorów zasadowych - **żelazo-niklowe i kadmowo-niklowe**. Akumulatory te mają praktycznie jednakowe parametry użytkowe, a różnią się jedynie nieznacznie właściwościami eksploatacyjnymi.

Podstawowymi elementami ogniwa akumulatora kadmowo-niklowego są:

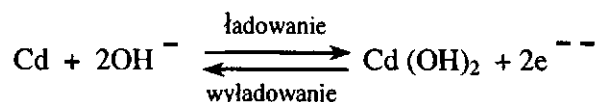
- płyta dodatnia z masą czynną wodorotlenku niklu  $\text{Ni(OH)}_2$ ,
- płyta ujemna z masą czynną wodorotlenku kadmu  $\text{Cd(OH)}_2$ ,
- elektrolit - roztwór wodny wodorotlenku potasu  $\text{KOH}$  z dodatkiem wodorotlenku litu, o gęstości  $\rho = 1,2 \text{ g/cm}^3$ .

Proces chemiczny zachodzący w akumulatorze Ni-Cd na płycie dodatniej jest następujący:

płyta dodatnia



płyta ujemna



Wynika z tego, że w czasie ładowania wydziela się woda, zatem elektrolit będzie zmniejszał swoją gęstość. Zmiana gęstości elektrolitu jest jednak nieznaczna i nie może być miarą stopnia naładowania akumulatora.

Siła elektromotoryczna i napięcie znamionowe w akumulatorach zasadowych wynosi:

$$E_n = 1,3 \text{ V} \quad \text{i} \quad U_n = 1,2 \text{ V}$$

Rezystancja wewnętrzna akumulatorów zasadowych jest nieco większa niż w akumulatorach kwasowych, co w połączeniu z niższą siłą elektromotoryczną (większa ilość ogniw w baterii) powoduje, że akumulatory zasadowe praktycznie nie są przydatne jako akumulatory rozruchowe. Natomiast znacznie lepszą trwałość, mniejszy ciężar, większą szczelność i odporność na samowyładowanie w porównaniu z akumulatorami kwasowymi sprawiają, że akumulatory te doskonale nadają się do zasilania urządzeń oraz jako akumulatory awaryjne.

**Ładowanie akumulatorów zasadowych**, podobnie jak kwasowych, dokonuje się prądem stałym o wartości zależnej od pojemności. Dopuszczalna wartość prądu jest jednak znacznie większa niż w akumulatorach kwasowych i wynosi:

$$I_l = 0,25 \cdot Q \quad [\text{A}]$$

a maksymalnie:

$$I_{l_{\max}} = 0,5 \cdot Q \quad [\text{A}]$$

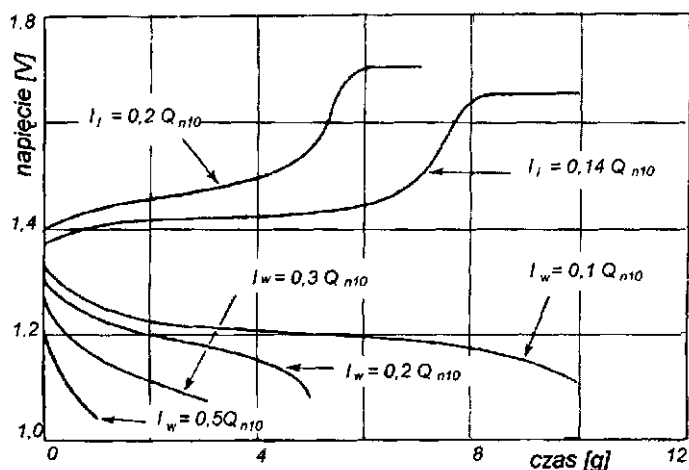
Stan naładowania akumulatorów zasadowych określamy wartością napięcia w czasie ładowania, które wynosi przy temperaturze 20°C:

$$U_\mu = 1,4 + 1,8 \text{ V}$$

**Wyładowanie akumulatorów zasadowych**, bez szkody dla nich, można prowadzić różną wielkością prądu do napięcia końcowego w trakcie obciążenia jak podano niżej:

przy	$I = 0,2 \cdot Q$	do	$U_w = 1,0 \text{ V}$
	$I = 0,33 \cdot Q$		$U_w = 0,95 \text{ V}$
	$I = 0,5 \cdot Q$		$U_w = 0,87 \text{ V}$

Zależność napięcia na zaciskach akumulatora od czasu pracy pokazano na rys. 10.4.



Rys. 10.4. Zmiana napięcia na zaciskach akumulatora kadmowo-niklowego w czasie ładowania i rozładowania

W czasie pracy akumulatorów otwartych następuje wyparowanie elektrolitu, który należy uzupełnić wodą destylowaną lub demineralizowaną.

Oprócz omówionych wyżej akumulatorów zasadowych o przeznaczeniu przemysłowym, rozpowszechnione są również akumulatory miniaturowe - srebrowo-cynkowe oraz srebrowo-litowe. Siła elektromotoryczna tych akumulatorów wynosi 1,5 V. Używane są one do zasilania urządzeń elektroniki użytkowej - telefonów komórkowych, sprzętu komputerowego, lamp błyskowych itd.

## 10.4. Obsługa akumulatorów

Akumulatory są mało zawodnym urządzeniem elektrycznym, jednak wymagają przestrzegania podstawowych zasad eksploatacyjnych.

1. Poziom elektrolitu powinien wynosić ok. 10 mm ponad płyty. Przy przezroczystej obudowie powinien on zawierać się pomiędzy poziomem „min” i „max”.
2. Poziom elektrolitu należy wyrównywać przed ładowaniem, uzupełniając jedynie wodą destylowaną lub demineralizowaną.
3. Akumulatory powinny być utrzymywane w stanie naładowanym.
4. Powierzchnie akumulatorów muszą być czyste i suche. Trzeba je oczyszczać wilgotną (wodą destylowaną) tkaniną bawełnianą.
5. Końcówki, sworznie i nakrętki powinny być oczyszczone z nalotu i kryształków siarczanów oraz zakonserwowane cienką warstwą wazeliny technicznej.

6. Należy kontrolować czy nie występują pęknięcia i wycieki elektrolitu.
7. W przypadku dłuższego unieruchomienia akumulatora, należy w okresach ok. co 4 tygodnie podładować do stanu pełnego naładowania.

Baterie akumulatorów najczęściej są używane na statkach jako awaryjne źródło energii elektrycznej i wtedy są one umieszczane w osobnych pomieszczeniach zwanych **akumulatorniami**. Akumulatory kwasowe i zasadowe muszą być umieszczone w oddzielnych akumulatorniach ze względu na wzajemne niszczące oddziaływanie (pary kwasu siarkowego mogą wchodzić w reakcję z zasadą potasową).

Akumulatory w czasie pracy wydzielają opary związków chemicznych oraz wodór. Powoduje to, że atmosfera w akumulatorni jest szkodliwa dla ludzi i materiałów, a także niebezpieczna pod względem wybuchowym. Dlatego pomieszczenia akumulatorowe muszą spełniać następujące wymagania:

1. Ogniwa akumulatorowe umieszcza się w koszach z przekładkami dystansowymi pomiędzy nimi w celu umożliwienia wentylacji.
2. Wszystkie części konstrukcyjne powinny być zabezpieczone przed szkodliwym działaniem elektrolitu i gazu.
3. Ogrzewanie pomieszczenia powinno być wykonane jako wodne lub parowe albo zrealizowane kosztem ciepła przylegających pomieszczeń. Temperatura podczas eksploatacji nie powinna być niższa niż  $+5^{\circ}\text{C}$ . Nie wolno stosować okrętowej instalacji klimatyzacyjnej.
4. Pomieszczenie akumulatorów powinno posiadać skuteczną wentylację, zapobiegającą tworzeniu się i gromadzeniu mieszanek wybuchowych. Przy sztucznej wentylacji, ładowanie akumulatorów powinno być możliwe tylko przy pracującym wentylatorze.
5. W akumulatorni nie należy instalować żadnych urządzeń elektrycznych, z wyjątkiem opraw oświetleniowych w wykonaniu przeciwwybuchowym (Ex) oraz kabli prowadzących do akumulatorów i lamp oświetleniowych.
6. Na drzwiach wejściowych akumulatorni należy umieścić napisy ostrzegające o niebezpieczeństwie wybuchu.

## 11. Aparaty i zabezpieczenia elektryczne

### 11.1. Zwarcia w okrętowych systemach energetycznych

Zwarcie awaryjne nazywamy nieprzewidziane zetknięcie biegunów źródła energii elektrycznej przy jego znamionowym napięciu, przy czym w obwodzie zwartym występują prądy znacznie większe od znamionowego. Zwarcie powoduje szereg ujemnych skutków dla urządzeń elektrycznych, znajdujących się w obwodzie zwartym, wywołane zwiększonymi prądami. Występują wtedy narażenia dynamiczne (siły elektrodynamiczne występujące między przewodami, w których płynie prąd) i termiczne (ciepło Joule'a-Lenza wydzielane w urządzeniach i przewodach). Siły elektrodynamiczne mogą spowodować uszkodzenia mechaniczne wyłączników, izolatorów, uzwojeń maszyn elektrycznych i transformatorów, wygięcia szyn itd. Ciepłe skutki zwarcia powodują szybkie niszczenie izolacji, topienie się elementów przewodzących, zapłon materiałów łatwo palnych itp. Ponadto przysiadły napięcia występujące w czasie zwarcia mogą powodować wypadnięcie prądnic z synchronizmu, utyk silników asynchronicznych, samoczynne wyłączenia łączników itd.

Ze względu na drogę prądu zwarcia rozróżnia się **zwarcia metaliczne** (ostre) i **łukowe** (tępe), gdy przynajmniej część obwodu zwarcia zamyka się przez łuk elektryczny. W obliczeniach dla uproszczenia przyjmuje się, że w tym samym obwodzie prąd zwarcia metalicznego jest dwukrotnie większy od prądu zwarcia łukowego.

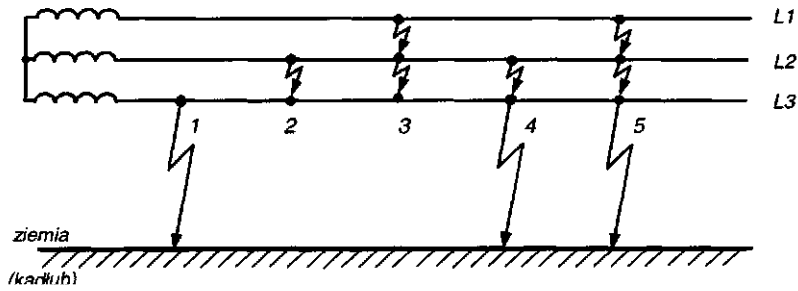
W instalacjach okrętowych klasyfikuje się zwarcia również w zależności od miejsca występowania w systemie jako **bliskie** (na zaciskach prądnicy i szynach rozdzielnic głównej) oraz **dalekie** (w pozostałej części systemu).

W zależności od miejsca zwarcia w sieci wyróżnia się zwarcia (rys. 11.1):

- **jednofazowe** - zwarcie fazy z przewodem zerowym lub ziemią (kadłubem statku),
- **dwufazowe** - między dwoma fazami,
- **trójfazowe** - między trzema fazami.

Oprócz wyżej wymienionych mogą występować zwarcia dwu- i trójfazowe z ziemią.





Rys. 11.1. Rodzaje zwarć w sieci trójfazowej, trójprzewodowej: 1 - jednofazowe, 2 - dwufazowe, 3 - trójfazowe, 4 - dwufazowe z ziemią, 5 - trójfazowe z ziemią

Przebieg czasowy prądu zwarcia zasilanego prądnicą synchroniczną ma bardzo złożony charakter. W czasie zwarcia w prądnicach zachodzą przejściowe zmiany siły elektromotorycznej (trwające do  $0,5 \cdot 10^{-3}$  s, zależnie od odległości miejsca zwarcia). Indukcyjno-rezystancyjny charakter obwodów obciążenia powoduje przepływ składowej nieokresowej prądu zwarcia o zanikającym charakterze. Ponadto, jeżeli w obwodzie zwarcia pracowały silniki asynchroniczne, to ich siły elektromotoryczne zasilają obwód dodatkową składową prądu zwarcia (w obliczeniach przyjmuje się tzw. silnik zastępczy, którego prąd znamionowy jest równy sumie prądów znamionowych silników o mocy większej od 5 kW). Uproszczony przebieg czasowy prądu zwarcia pokazano na rys. 11.2. Można na nim wyróżnić dwie charakterystyczne wielkości - największą wartość chwilową prądu zwarcia, występującą w pierwszym półokresie zwarcia zwaną **prądem udarowym** (decyduje on o dynamicznych skutkach zwarcia) oraz wartość skuteczną prądu zwarcia, występującą po ustaniu procesów przejściowych (decydującą o cieplnych skutkach zwarcia) zwaną **ustalonym prądem zwarcia**.

Obliczanie prądów zwarcia jest dość pracochłonne, dlatego stosuje się metody uproszczone, korzystając z wzorów empirycznych, tabel i wykresów. Na przykład prąd udarowy na szynach zbiorczych rozdzielni głównej w układzie przedstawionym na rys. 11.3 można obliczyć ze wzoru:

$$i_u = n \cdot \sqrt{2} \cdot k_u \cdot \frac{U_n}{X_d''} + 8 I_{ns}$$

gdzie:

- $n$  - ilość pracujących prądnic,
- $k_u$  - współczynnik zależny od stosunku rezystancji obwodu zwarcia do jego reaktancji dobierany na podstawie tabel lub wykresów,  $U_n$  - napięcie znamionowe prądnic,

$X_d$  - tzw. reaktancja nadprzejściowa prądnic (umowna reaktancja prądnic w pierwszych okresach zwarcia i wynosząca ok. 0,05 do 0,1 reaktancji wewnętrznej prądnic),

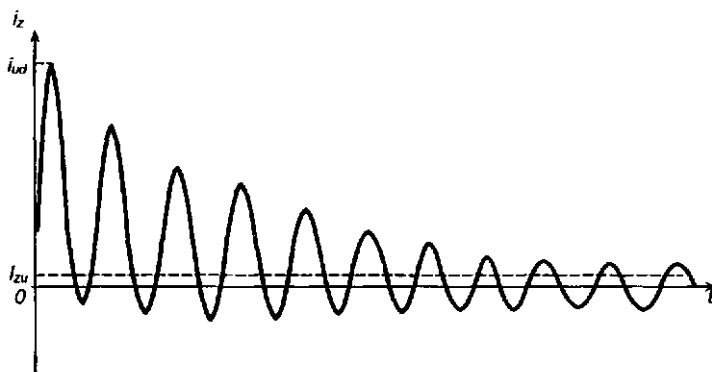
$I_{nS}$  - prąd silnika zastępczego będący sumą prądów znamionowych pracujących silników asynchronicznych o mocy  $P_n > 5$  k W),

a wartość skuteczna ustalonego prądu zwarcia:

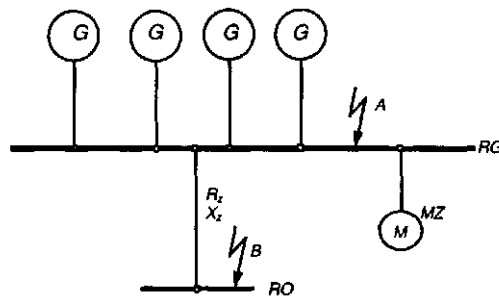
$$I_{zu} = \frac{U_n}{X_d} + 6,25I_{nS} \quad (11.2)$$

gdzie:

$X_d$  – reaktancja wewnętrzna prądnic.



Rys. 11.2. Uproszczony przebieg czasowy prądu zwarcia:  $i_{uel}$  - prąd udarowy,  $I_m$  - ustalony prąd zwarcia



Rys. 11.3. Schemat do obliczania zwarć:

$RG$  - rozdzielnica główna,  $RO$  - rozdzielnica grupowa,  $MZ$  - silnik zastępczy,  $A$  - zwarcie bliskie (na szynach  $RG$ ),  $B$  - zwarcie dalekie (na szynach  $RO$ )

Przy obliczaniu zwarć dalekich należy uwzględnić rezystancję  $R_z$  i reaktywność  $X_z$  przewodów łączących miejsce zwarcia z rozdzielnicą główną, co znacznie zmniejszy prąd zwarcia.

W obliczeniach wstępnych na etapie projektu kontraktowego statku (gdzie znana jest tylko orientacyjna ilość i moc prądnic a zachodzi potrzeba określenia własności aparatury zabezpieczającej) często stosuje się wzory szacunkowe, określające wartość prądu udarowego np.:

$$i_u = 35 I_{np} \quad (11.3)$$

gdzie  $I_{np}$  - znamionowy prąd wszystkich prądnic zasilających zwarcie.

W systemach energetycznych stosuje się różne środki zapobiegające powstawaniu zwarć takie jak:

- odpowiednia konstrukcja i staranne wykonanie urządzeń,
- wybór takich tras kabli, aby były one jak najmniej narażone na uszkodzenia mechaniczne,
- uważna obsługa i staranna konserwacja urządzeń.

Środki te zmniejszają, ale nie wykluczają możliwości występowania zwarć, dlatego też układ powinien być przygotowany do ograniczania prądów zwarciovych. Ograniczenie to polega z jednej strony na zmniejszeniu prądów zwarciovych m.in. przez stosowanie dławików zwarciovych zwiększających impedancję obwodu zwarcia, a z drugiej strony na przerywaniu przebiegu prądu zwarciovego zabezpieczeniami zwarciovymi wyłączającymi obwody, w których płynie prąd zwarcia.

## 11.2. Łączniki elektryczne

### 11.2.1. Klasyfikacja aparatów elektrycznych

Określenie **aparatu elektrycznego** jest bardzo szerokim pojęciem, lecz powszechnie używanym w rozumieniu łączników elektrycznych. Łączniki elektryczne zatem są aparatami przeznaczonymi do przewodzenia określonych prądów oraz do wykonywania czynności łączeniowych w obwodach urządzeń elektroenergetycznych.

Przydatność łączników do wykonywania określonych zadań w układzie elektroenergetycznym jest charakteryzowana wieloma parametrami. Normy dotyczące łączników elektrycznych podają bardzo wiele różnych parametrów i definicji, charakteryzujących właściwości tych aparatów. Do najważniejszych z nich należą wymienione poniżej.

**Napięcie znamionowe** - wartość napięcia, na które urządzenie zostało zbudowane i oznaczone.

**Prąd znamionowy ciągły** - wartość skuteczna natężenia prądu, płynącego przez tor prądowy dowolnie długo, nie powodując wzrostu temperatury powyżej dopuszczalnej w określonych warunkach narażeńiowych.

**Prąd znamionowy wyłączalny** - największa wartość skuteczna prądu, którą łącznik może wyłączyć bez uszkodzeń i być przydatny do dalszej pracy (nie dotyczy to jednak bezpieczników).

**Prąd znamionowy załączalny** — największa chwilowa wartość prądu załączanego, którą łącznik może załączyć bez trwałego zespawania się styków oraz innych uszkodzeń, powodujących niezdatność łącznika do dalszej pracy.

**Prąd znamionowy szczytowy** - największy prąd szczytowy (udarowy), mogący przepłynąć przez łącznik przy zamkniętych stykach łącznika, nie powodując trwałego zespawania się styków ani innych uszkodzeń.

**Trwałość mechaniczna** - największa liczba cykli łączeniowych, które może wykonać łącznik nie obciążony prądem, bez dopuszczalnego przekroczenia zużycia jego elementów.

**Trwałość łączeniowa** - największa liczba cykli łączeniowych, które można wykonać łącznikiem z określoną częstotliwością i ą łączy w obwodzie probierczym, bez przekroczenia określonego zużycia jego elementów.

**Kategoria użytkowania** - zespół narażeń eksploatacyjnych określonych własnościami i warunkami pracy sterowanych obwodów i odbiorników charakteryzowanych prądem załączeniowym i wyłączeniowym, współczynnikiem mocy albo stałą czasową sterowanego obwodu.

Wyróżniamy następujące kategorie użytkowania w obwodach prądu przemiennego:

- AC-1 łącznie obciążeń nieindukcyjnych i mało indukcyjnych,
- AC-2 łącznie silników indukcyjnych pierścieniowych — rozruch i wyłączenie przy znamionowej prędkości obrotowej,
- AC-3 łącznie silników asynchronicznych klatkowych - rozruch bezpośredni, wyłączenie przy znamionowej prędkości obrotowej,
- AC-4 łącznie silników asynchronicznych klatkowych - rozruch bezpośredni, impulsowanie i rewersowanie.

Prądy płynące w obwodach można podzielić na **prądy robocze** (obejmujące prądy znamionowe oraz prądy przeciążeniowe - o wartości do ok. 7 /,,) i **prądy zwarciove** o wartościach powyżej 7 /,, (granica 7 /,, jest granicą umowną opartą na prądzie rozruchowym silnika asynchronicznego).

Łączniki elektryczne niskiego napięcia (o napięciach znamionowych do 1000 V prądu przemiennego i 1500 V prądu stałego) ze względu na zdolność łączeniową dzielą się na:

- a) **łączniki zwarciove (wyłączniki)** - przeznaczone do załączania i wyłączania obwodów obciążonych prądami roboczymi oraz zwarcioowymi w tym:
  - mechanizmowe (posiadające napęd z zamkiem i zestyki ruchome),
  - bezstykowe (bezpieczniki topikowe);
- b) **łączniki robocze (rozłączniki)** - przeznaczone do załączania obwodów obciążonych prądami roboczymi w zwykłych warunkach roboczych;
- c) **łączniki izolacyjne (odłączniki)** - pracujące sporadycznie w stanie bezprądowym lub przy prądach o niewielkiej wartości.

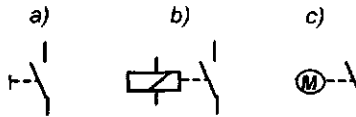
Ze względu na budowę, rodzaj wykonania i zakres stosowania w łącznikach elektrycznych można wyróżnić m. in.:

- **bezpieczniki** — bezstykowe łączniki topikowe stosowane jako zabezpieczenia przeciążeniowe i zwarciove w instalacjach elektrycznych;
- **łączniki rozdzielcze** - służące do załączania i zabezpieczania obwodów zasilających urządzenia w tym:
  - o **wyłączniki zwarciove** - samoczynne łączniki rozdzielcze z mechanizmem zamkowym stosowane jako zabezpieczenia zwarciove i przeciążeniowe w różnych warunkach,
  - o **wyłączniki instalacyjne i wyłączniki silnikowe** - samoczynne łączniki rozdzielcze z mechanizmem zamkowym stosowane jako zabezpieczenia zwarciove i przeciążeniowe w instalacjach elektrycznych o prądach znamionowych do 100 A;
- **łączniki manewrowe** - przeznaczone do załączania obwodów obciążonych prądami roboczymi, charakteryzujące się dużą trwałością mechaniczną i łączeniową oraz znaczną znamionową częstością łączy;
- **styczniki** - łączniki manewrowe z napędem elektromagnetycznym; styczniki wyposażone w przekaźniki nadmiarowo-prądowe zabezpieczające przed przeciążeniem noszą nazwę **wyłączników styczniko-wych**;
- **łączniki sterownicze** - przyciskowe, dźwigienkowe, stosowane w obwodach pomocniczych - sterowania i sygnalizacji;
- **łączniki krańcowe** (reagujące na zmianę parametru nieelektrycznego) - termostaty, pressostaty, łączniki drogowe, łączniki pływakowe itd. stosowane w obwodach pomocniczych;
- **wyłączniki ochronne** - różnicowoprądowe i napięciowe, stosowane jako zabezpieczenia przeciwporażeniowe;

# r

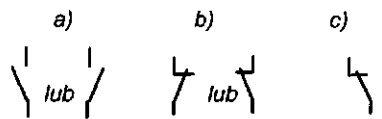
## Napędy łączników

- a) ręczny
- b) elektromagnetyczny
- c) silnikowy



## Styki łącznika

- a) styk zwiemy
- b) styk rozwierny
- c) styk przełączny

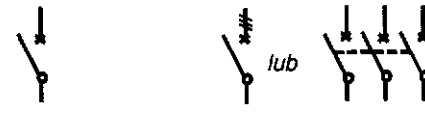


## Łączniki

### jednotorowy

### trzytorowy

#### zwarciovoy



#### manewrowy (stycznik)

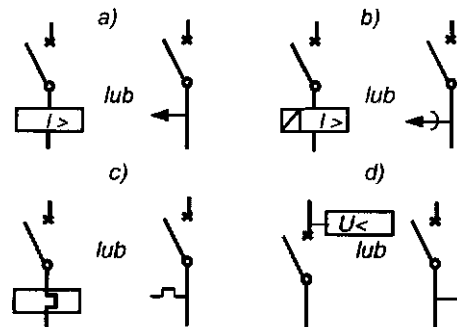


#### odłącznik



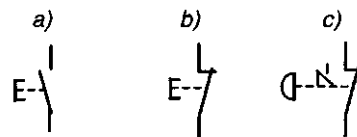
## Wyzwalacze łączników samoczynnych

- a) nadprądowy bezzwłoczny
- b) nadprądowy zwłoczny
- c) nadprądowy termobimetalowy
- d) podnapięciowy



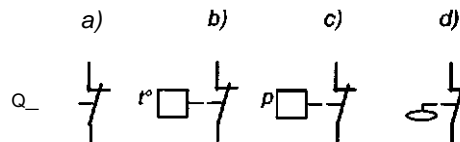
## Przyciski sterownicze

- a) styk zwiemy przycisku zwrotnego
- b) styk rozwierny przycisku zwrotnego
- c) przycisk bezpieczeństwa



## Łączniki krańcowe (rozwierne)

- a) drogowy
- b) termostat
- c) presostat
- d) łącznik pływakowy



Rys. 11.4. Wybrane symbole łączników elektrycznych

- **przekazniki** - łączniki pracujące w obwodach pomocniczych, przełączające, zabezpieczające (reagujące na zmianę parametru elektrycznego - nadmiarowo-prądowe, nadnapięciowe, podnapięciowe, różnicowe, zwrotnomocowe itd.), zwłoczne (załączające lub wyłączające z opóźnieniem czasowym), programowe (wykonujące w zadanym czasie określony program łączy) itp.

Do najważniejszych elementów składowych łącznika należą:

- **napęd** - ręczny lub samoczynny (np. elektromagnetyczny, silnikowy, pneumatyczny); napęd może być wyposażony w **zamek** utrzymujący styki w stanie zamkniętym;
- **styki ruchome i nieruchome, w tym styki główne** pracujące w obwodzie głównym i **styki pomocnicze** (poruszające się razem ze stykami głównymi) - pracujące w obwodach pomocniczych sterowania i sygnalizacji (o prądach znamionowych do 5 A); styki główne zazwyczaj wyposażone są w elementy układu gaszącego łuk elektryczny;
- wyposażenie dodatkowe - np. **wyzwalacze** (urządzenia zwalniające zamek), **przekazniki** (przerwywające obwód elektromagnesu napędowego lub uruchamiające wyzwalacze) itp.

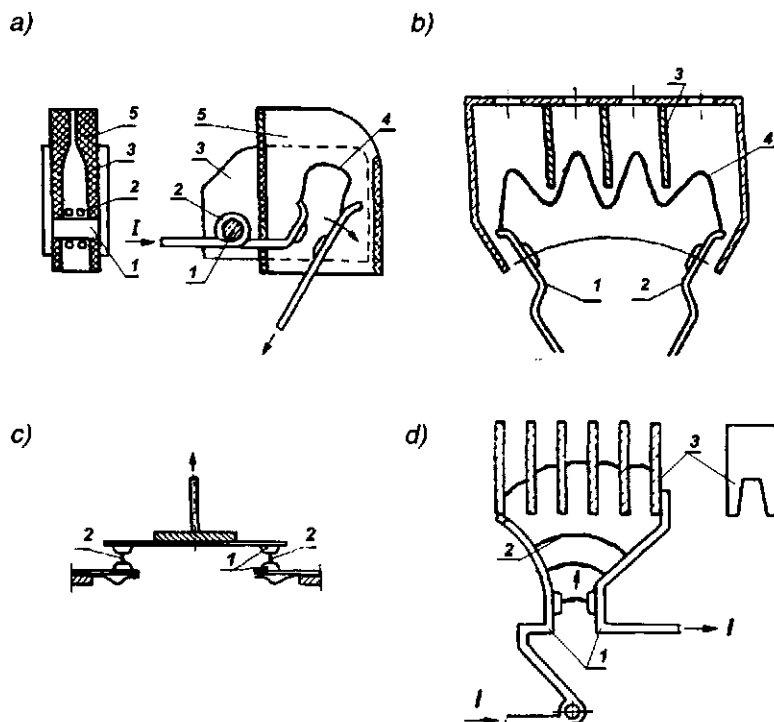
Wyjątek stanowią łączniki wtykowe - gniazda i wtyczki, bezpieczniki topikowe - bezstykowe łączniki zwarciove jednorazowego użytku oraz bezstykowe łączniki półprzewodnikowe, np. łączniki tyrystorowe.

Łączniki izolacyjne i rozłączniki mają napęd ręczny. Łączniki zwarciove mogą być załączane i wyłączane ręcznie lub samoczynnie, są zawsze jednak przystosowane do wyłączania samoczynnego (przez wyzwalacze). Łączniki manewrowe mają napęd ręczny lub samoczynny, zazwyczaj są przystosowane do zdalnego sterowania (styczniki) i mogą być wyposażone w zabezpieczenia przeciążeniowe.

Problem gaszenia łuku elektrycznego występującego przy operacjach łączy jest jednym z najistotniejszych przy budowie aparatów. Łuk powstający przy łączeniu powinien być jak najszybciej zgaszony. Okrętowe łączniki niskonapięciowe są budowane jako suche tzn., że środowiskiem, w którym pali się łuk jest powietrze (łączniki lądowe mogą być wykonane np. jako olejowe). Przy gaszeniu łuku elektrycznego wykorzystuje się to, że napięcie potrzebne do podtrzymania łuku zależy od jego długości, a więc wydłużenie łuku spowoduje (przy niezmiennym napięciu) jego zgaszenie. Ponadto łuk wytwarza dużo ciepła, a przez to wywołuje ruch konwekcyjny powietrza unoszący łuk do góry. Stosuje się najczęściej następujące sposoby gaszenia łuku:

- a) rozdzielanie styków z dużą szybkością, a przez to naturalne wydłużenie łuku przez zwiększenie odległości pomiędzy stykami;
- b) wydłużenie łuku przez wydmuch elektromagnetyczny (rys. 11.5 a);

- c) wydłużenie łuku przez zastosowanie płytek izolacyjnych w komorze gaszeniowej (rys. 11.5 b);
- d) podział łuku na dwie części w łącznikach dwuprzerwowym (rys. 11.5 c);
- e) podział łuku na kilka krótkich części palących się między metalowymi płytkami w komorze gaszeniowej (rys. 11.5 d).



Rys. 11.5. Sposoby gaszenia łuku w łącznikach elektrycznych:

- a) komora gaszeniowa łącznika z wydmuchem elektromagnetycznym: 1 - jarzmo elektromagnesu, 2 - cewka elektromagnetyczna, 3 - nabiegunniki, 4 - łuk, 5 - komora dyszowa;
- b) komora łukowa o poprzecznych przegrodach izolacyjnych: 1 - styk nieruchomy, 2 - styk ruchomy, 3- przegrody, 4 - łuk elektryczny;
- c) łącznik ze stykiem dwuprzerwowym: 1 - styki, 2 - łuk elektryczny;
- d) komora gaszeniowa z płytkami dejonizacyjnymi: 1 - styki, 2 - łuk elektryczny, 3 - płytki dejonizacyjne



### 11.2.2. Łączniki wtykowe

Łączniki wtykowe składają się z gniazda wtyczkowego i wtyczki. Służą do przyłączania do sieci elektroenergetycznej odbiorników ręcznych i ruchomych. Łączniki wtykowe nie mają urządzeń do gaszenia łuku elektrycznego, z tego też względu ich robocza zdolność łączenia jest niewielka, najczęściej nie przekraczająca prądów znamionowych.

Przy większych prądach, gniazda wtyczkowe i wtyczki spełniają tylko rolę łączników izolacyjnych tzn., że proces załączenia lub wyłączenia odbywa się przy wyłączonym prądzie. Typowym przykładem takiego rozwiązania są okrętowe łączniki wtykowe kontenerowe.

**Kontenerowe łączniki wtykowe** są zbudowane w ten sposób, że trójfazowe gniazdo wtykowe jest konstrukcyjnie połączone w jedną całość z łącznikiem ręcznym. Istnieje też mechaniczna blokada, uniemożliwiająca wyjęcie lub włożenie wtyczki przed wyłączeniem łącznika.

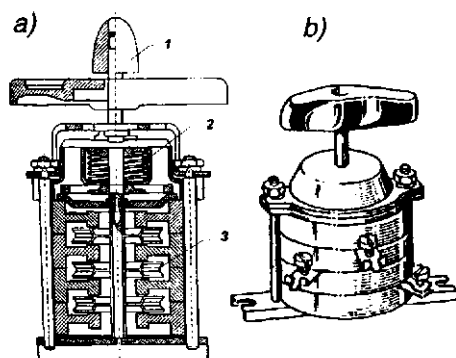
Istotnym problemem jest zapewnienie odpowiedniej kolejności faz we wszystkich wtyczkach urządzeń kontenerowych i gniazdach wtyczkowych znajdujących się na statku, przewidzianych do zasilania kontenerów izotermicznych. Zapewnione to jest przez odpowiednie ukształtowanie obudów gniazd i wtyczek, umożliwiające ich złączenie tylko w określony sposób.

### 11.2.3. Łączniki ręczne

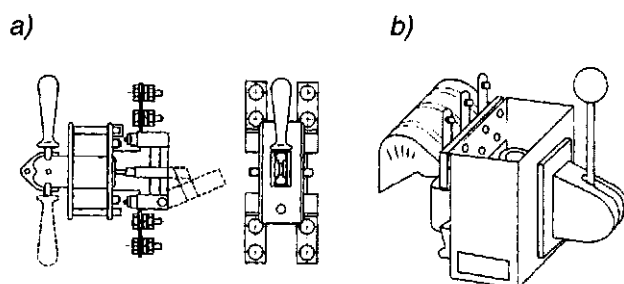
Cechą charakterystyczną łączników ręcznych jest to, że zmiana położenia styków ruchomych dokonuje się ręcznie za pomocą dźwigni. Istnieje wiele konstrukcji łączników ręcznych. Najczęściej spotyka się następujące rodzaje:

- a) **łączniki puszkowe** budowane na prądy 6 i 10 A i napięcie 250 V służą najczęściej do sterowania odbiorników oświetleniowych. Mechanizm napędowy zapewnia szybkie zamykanie i otwieranie styków niezależnie od prędkości przekręcania lub siły nacisku na dźwignię, dzięki działaniu mechanizmu migowego. Budowane są w wykonaniu podtynkowym i natynkowym (na napięcie 250 V i prądy 6, 10 i 16 A);
- b) **łączniki warstwowe** (pakietowe) są budowane jako szczękowe (rys. 11.6) lub krzywkowe. W łącznikach szczękowych ruch obrotowy styków ruchomych, najczęściej w formie szczęk powoduje stykanie się lub rozwieranie z nieruchomymi stykami wykonanymi w formie noża. W łącznikach krzywkowych, ruch obrotowy dźwigni powoduje obrót krzywki, która popycha sprężynujące ramię styków ruchomych. Łączniki warstwowe najczęściej są wykonywane jako jedno- i trójfazowe na napięcie 500 V i prądy 10, 25, 60 i 100 A;

c) **łączniki nożowe** (rys. 11.7) budowane są w ten sposób, że ruch pionowy lub obrotowy dźwigni porusza styki ruchome (w formie noża), powodując połączenie ich ze stykami nieruchomymi. Ruch dźwigni do góry lub w prawo powoduje zamknięcie łącznika. Łączniki te w wykonaniu okrętowym budowane są jako trzytorowe.



Rys. 11.6. Łącznik warstwowy:  
 a) przekrój; b) widok; 1 - pokrętło napędowe; 2 - sprężyna napędowa, 3 - styk ruchomy



Rys. 11.7. Łączniki nożowe: a) łącznik jednotorowy; b) łącznik trzytorowy

#### 11.2.4. Bezpieczniki topikowe

Bezpieczniki topikowe są łącznikami jednorazowego użytku przeznaczonymi do przerywania obwodów elektrycznych, w których prąd przekracza pewną określoną wartość w ciągu dostatecznie długiego czasu. Najważniejszą częścią bezpiecznika jest **metalowy element topikowy**, przeznaczony do stopienia się przy zadziałaniu bezpiecznika. Element topikowy wykonany z drutu lub paska z miedzi, lub srebra znajduje się wewnątrz porcelanowej **wkładki bezpiecznikowej** wypełnionej piaskiem kwarcowym, ułatwiającym zgaszenie łuku powstającego przy przerwaniu drutu topikowego.

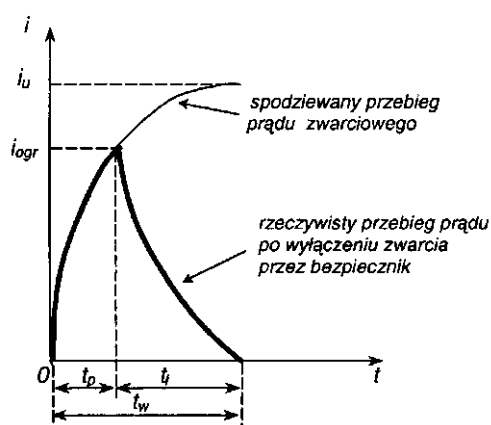
Działanie bezpiecznika oparte jest na wydzielaniu się ciepła na elemencie topikowym. Ponieważ ciepło, wydzielone na dowolnej rezystancji  $R$ , wynosi:

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

więc istnieje ścisła zależność pomiędzy czasem przerywania obwodu a natężeniem prądu, który spowodował to przerywanie.

Wyróżniamy następujące czasy działania bezpiecznika:

- **czas przedłukowy**  $t_p$  jest to czas od chwili wystąpienia prądu powodującego zadziałanie bezpiecznika do chwili zapalenia się łuku;
- **czas łukowy**  $t_l$  jest to czas od chwili powstania łuku do momentu jego zgaszenia czyli przerywania obwodu;
- **czas wyłączenia**  $t_w$  jest sumą czasów  $t_p + t_l$  (rys. 11.8).

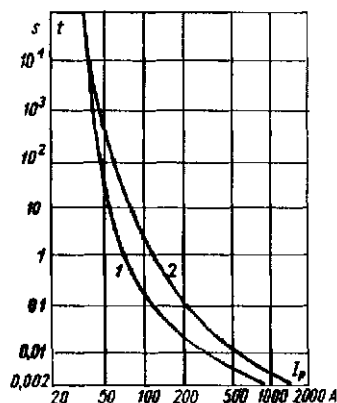


Rys. 11.8. Działanie bezpiecznika topikowego:

$t_p$  - czas przedłukowy,  $t_l$  - czas łukowy,  $t_w$  - czas wyłączenia bezpiecznika,  $i_{ogr}$  - prąd ograniczony bezpiecznika,  $i_u$  - prąd udarowy

Z rysunku 11.8 widać, że w czasie zwarcia przez bezpiecznik nie popłynie prąd maksymalny  $i_{\infty}$ , lecz znacznie mniejsza wartość określona jako  $i_{0\&}$ . Bezpiecznik zatem ma możliwość wyłączenia prądu wcześniej niż osiągnie on wartość maksymalną. **Prąd ograniczony bezpiecznika**  $I_{ogr}$  jest to największa chwilowa wartość prądu zwarciovego, występująca w obwodzie w chwili zapłonu łuku w bezpieczniku.

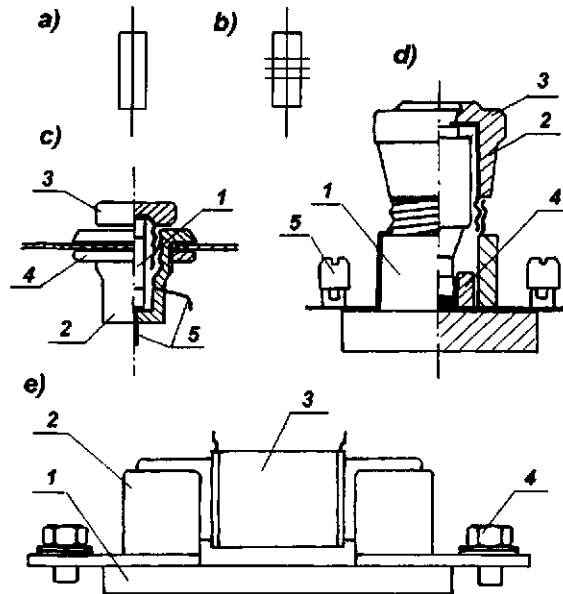
Zależność średnich czasów przedłukowych od wartości prądu przepływającego przez bezpiecznik nazywamy **charakterystyką prądowo-czasową**  $t = f(I)$  (potocznie używa się nazwy **charakterystyka  $t$  -/**) wkładki bezpiecznikowej (rys. 11.9).



Rys. 11.9, Charakterystyki  $t$ - $I$  wkładek bezpiecznikowych o prądzie znamionowym 25 A: 1 - wkładki o działaniu szybkim, 2 - wkładki o działaniu zwłocznym

Ze względu na czas działania (przy jednakowym prądzie) rozróżniamy bezpieczniki o działaniu szybkim oraz zwłocznym (działające z opóźnieniem, a przez to wytrzymujące krótkotrwałe podskoki prądu, np. występujące przy rozruchu silnika). Bezpieczniki charakteryzowane są również ze względu na zdolność wyłączalną- największą wartość skuteczną prądu, którą wkładka topikowa może przerwać bez uszkodzeń (np. eksplozji w chwili przepalania się).

**Bezpieczniki aparatowe** (rys. 11.10 a i 11.11 a) są budowane na napięcie znamionowe 250 V i prądy znamionowe od 0,01 do 10 A. Wkładka topikowa wykonana jest w formie rurki szklanej, wewnątrz której znajduje się drut topikowy. Wkładka topikowa umieszczana jest w gnieździe składającym się z podstawy i główki lub w uchwycie szczękowym. Zdolność wyłączalną bezpieczników aparatowych wynosi ok. 1,5 kA. Stosowane są do zabezpieczania drobnych urządzeń elektrycznych i elektronicznych w obwodach o niewielkich prądach zwarciovych.



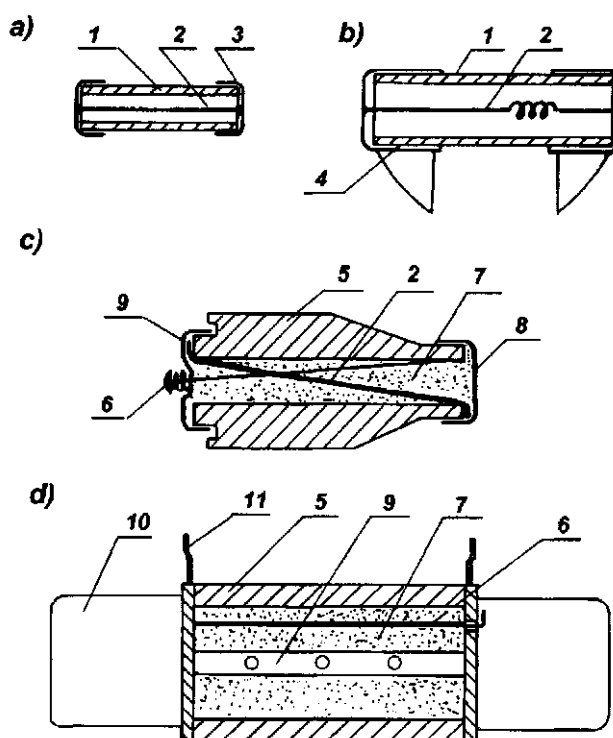
Rys. 11.10. Bezpieczniki niskiego napięcia: a) symbol bezpiecznika; b) symbol bezpieczników umieszczonych w trzech fazach; c) bezpiecznik aparatowy (1 - wkładka topikowa, 2 - gniazdo bezpiecznikowe, 3 - główka, 4 - pierścień dociskowy, 5 - końcówki łączeniowe); d) bezpiecznik instalacyjny (1 - gniazdo, 2 - wkładka topikowa, 3 - główka, 4 - wstawka dolna, 5 - zacisk łączeniowy); e) bezpiecznik stacyjny (1 - podstawa, 2 - uchwyt szczękowy, 3 - wkładka topikowa, zacisk łączeniowy)

**Bezpieczniki instalacyjne** (rys. 11.10 b i 11.11 b) składają się z podstawy (gniazda), główki bezpiecznikowej, wstawki kalibrowanej (uniemożliwiającej wstawienie do gniazd wkładki o większym prądzie znamionowym od przewidzianego) oraz wkładki topikowej. Bezpieczniki instalacyjne są budowane na prądy znamionowe od 2 do 200 A (w wykonaniu okrętowym do 63 A), jednak zakres ich praktycznego stosowania jest znacznie mniejszy ze względu na ich zdolność wyłączenia, która wynosi od 50 kA do 80 kA.

Bezpieczniki instalacyjne służą do zabezpieczenia przed skutkami zwarć odbiorników siłowych (przemysłowych) w miejscach, gdzie prądy zwarciove nie przekraczają zdolności wyłączenia bezpieczników. Bezpieczniki te służą również jako zabezpieczenie od przeciążeń obwodów oświetlenia i ogrzewania.

**Bezpieczniki stacyjne** (nazywane też bezpiecznikami mocy) składają się z podstawy bezpiecznikowej i wkładki topikowej (rys. 11.10 c i 11.11 d). W celu wymiany wkładki bezpiecznikowej należy posługiwać się izolacyjnym uchwytem, który chroni obsługę przed przypadkowym dotknięciem części będą-

cej pod napięciem. Bezpieczniki stacyjne są budowane na prądy znamionowe od 6 do 600 A, a ich zdolność wyłączalna wynosi 100 kA do 120 kA.



Rys. 11.11. Wkładki topikowe bezpieczników niskiego napięcia: a) bezpiecznik aparatowy; b) bezpiecznik niskiego napięcia; c) bezpiecznik instalacyjny; d) bezpiecznik stacyjny; 1 - rurka szklana, 2 - drut topikowy, 3 - kapturek stykowy, 4 - kapturek ze stykiem nożowym, 5 - korpus porcelanowy, 6 - wskaźnik zadziałania, 7 - piasek kwarcowy, 8 - okucia stykowe, 9 - blaszka topikowa, 10 - styk nożowy, 11 - zaczep do zakładania uchwytu montażowego

Do zabezpieczenia obwodów o napięciu znamionowym poniżej 30 V na statkach stosuje się **bezpieczniki niskonapięciowe**, których wkładka topikowa (rys. 11.11 b) jest wykonana z rurki szklanej, zaopatrzonej w styki nożowe, (wciskane w szczęki podstawy bezpiecznikowej), wewnątrz której umieszczony jest drut topikowy. Ze względu na bardzo małą zdolność wyłączalną, bezpieczników tych nie wolno stosować w obwodach o napięciu wyższym od 30 V.

### 11.2.5. Łączniki zwarciove mechanizmowe

Łączniki samoczynne zwarciove (wyłączniki) są przeznaczone do załączania i wyłączania prądów roboczych, przeciążeniowych oraz zwarciowych. Wyłączenie samoczynne może nastąpić w wyniku działania wyzwalaczy lub przekaźników, reagujących na pewne wielkości fizyczne jak: napięcie, natężenie prądu, temperaturę itp. Łączniki zwarciove składają się z następujących podstawowych elementów:

- napędu,
- zamka utrzymującego styki ruchome w stanie załączonym,
- układu zestykowego (styki ruchome i nieruchome),
- układu gaszeniowego złożonego z komór gaszeniowych,
- wyzwalacza zwarciowego o działaniu bezzwłocznym,
- wyzwalacza lub przekaźnika przeciążeniowego.

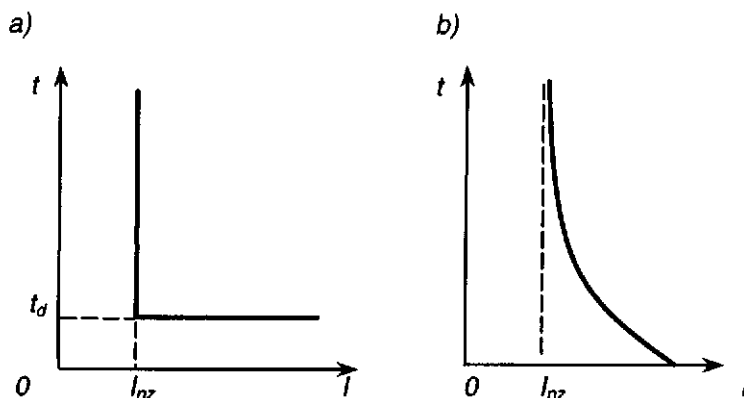
Łączniki zwarciove wykonywane na większe prądy znamionowe, zwykle są dodatkowo wyposażone w:

- wyzwalacz podnapięciowy,
- wyzwalacz zwarciowy o działaniu krótkozwłocznym,
- łączniki pomocnicze.

Najbardziej rozpowszechnionym napędem wyłączników samoczynnych jest napęd ręczny, w którym stan załączenia uzyskuje się wskutek bezpośredniego działania obsługi na układ dźwigni załączających. Wyłączniki na większe prądy znamionowe, oprócz napędu ręcznego, posiadają napęd elektromagnetyczny, silnikowy lub inny umożliwiający zdalne załączanie wyłącznika. Wyłączenie odbywa się w sposób migowy po zwolnieniu zamka, pod działaniem sprężyn zwrotnych napiętych w czasie załączania.

Utrzymanie wyłącznika w stanie zamkniętym bez udziału sił zewnętrznych, uzyskuje się przez zastosowanie specjalnego mechanizmu zwanego **zamkiem**.

Zabezpieczenia nadmiarowo-prądowe (nazywane też zabezpieczeniami nadprądowymi lub przetężeniowymi) są podstawowym wyposażeniem wyłączników i zabezpieczają urządzenia elektryczne przed skutkami przepływu prądów większych od znamionowych. Zabezpieczenia nadprądowe działające przy prądach o wielkości od  $I_n$  do  $7 I_n$ , stosowane są jako zabezpieczenia przeciążeniowe, zaś działające przy prądach większych stosuje się jako zabezpieczenia zwarciove. Sposób działania zabezpieczeń nadprądowych określają przedstawione na rys. 11.12 charakterystyki czasowo-prądowe  $t = f(I)$ , nazywane potocznie **charakterystykami  $t-I$** . Czas zadziałania  $t_d$  zabezpieczenia nadprądowego może być niezależny od prądu (pod warunkiem, że prąd płynący w obwodzie *zabezpieczanym* jest większy od prądu znamionowego zabezpieczenia), co zostało przedstawione na rys. 11.12 a lub uzależniony (rys. 11.12 b).



Rys. 11.12. Charakterystyki  $t$ - $I$  zabezpieczeń nadprądowych: a) charakterystyka prądowo niezależna; b) charakterystyka prądowo *zależna*

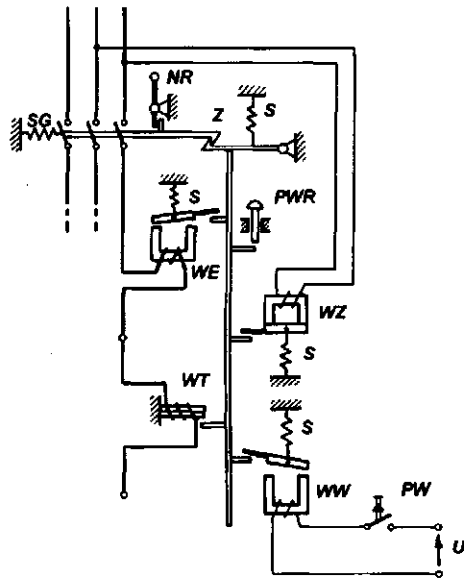
Zasadę działania elementów samoczynnego łącznika zwarciovego z mechanizmem zamkowym przedstawia rys. 11.13.

Wyzwalacz nadprądowy elektromagnetyczny  $WE$  ma charakterystykę  $t$ - $I$  niezależną (rys. 11.12 a) i służy do wyłączenia prądów zwarciovych (stąd często stosowana nazwa - wyzwalacz zwarciovy). Wyzwalacz termobimetalowy  $WT$  ma charakterystykę  $t$ - $I$  zależną (rys. 11.12 b) i działa przy prądach przeciążeniowych ze zwłoką zależną od wartości prądu. Wyzwalacz zanikowy  $WZ$  wyłącza łącznik w przypadku zaniku lub znacznego obniżenia napięcia. Wyzwalacz wybijakowy  $WW$  służy do zdalnego wyłączenia łącznika.

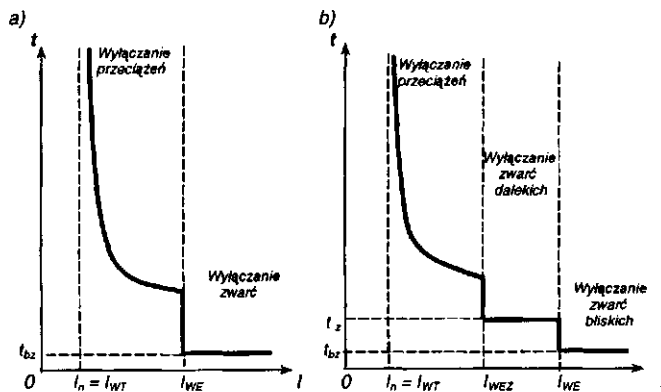
Charakterystyka  $t$ - $I$  wyłącznika z rys. 11.13 jest wypadkową charakterystyką wyzwalaczy nadprądowych (rys. 11.14 a). Łączniki zwarciovie z taką charakterystyką noszą nazwę wyłączników klasycznych. W wyłącznikach takich przeciążenia są wyłączone przez wyzwalacz termobimetalowy, a zwarcia - przez wyzwalacz elektromagnetyczny bezzwłoczny.

Wyłączniki wyposażone w dodatkowy wyzwalacz zwarciovy, działający z krótką zwłoką (rzędu 0,3 - 0,5 s) nazywane są **wyłącznikami selektywnymi** (lub **wyłącznikami wybiórczymi**). Wyłączniki te są stosowane jako np. wyłączniki główne prądnic na statkach. Charakterystykę  $t$ - $I$  wyłącznika selektywnego przedstawia rys. 11.14 b. Wyzwalacz krótkozwłoczny pozwala na krótkotrwałe przetrzymanie zwarc dalekich o mniejszych prądach (dając w ten sposób możliwość wyłączenia zwarcia łącznikom bliższym miejsca zwarcia, bez wyłączenia całego systemu).

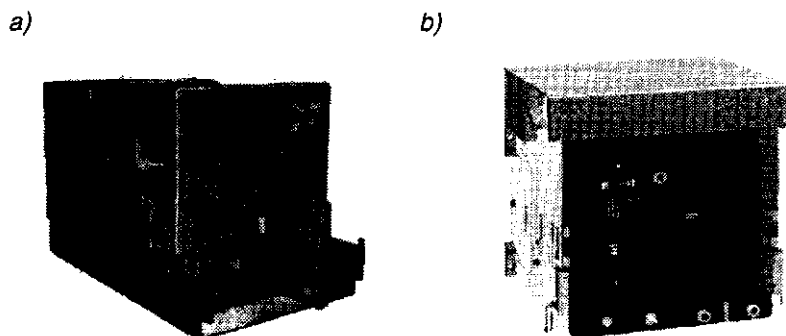




Rys. 11.13, Zasada działania łącznika samoczynnego zamkowego:  
 Z - zamek z zapadką, SG - sprężyna zwrotna styku, NR - dźwignia napędu ręcznego,  
 PWR - przycisk wyłączenia ręcznego, WE - wyzwalacz nadprądowy bezzwłoczny  
 (elektromagnetyczny), WT - wyzwalacz nadprądowy zwłoczny (termobimetalowy),  
 WZ - wyzwalacz podnapięciowy (zanikowy), WW - wyzwalacz wybijakowy,  
 P W - przycisk do wyłączenia zdalnego, S - sprężyna pomocnicza



Rys. 11.14. Charakterystyki  $t-I$  wyłącznika klasycznego (a) i selektywnego (b):  
 $I_n$  - prąd znamionowy wyłącznika,  $I_{WT}$  - prąd znamionowy wyzwalacza zwłoczno-  
 zależnego,  $I_{WE}$  - prąd znamionowy wyzwalacza bezzwłoczno-  
 zależnego,  $I_{WEZ}$  - prąd znamionowy wyzwalacza krótkozwłoczno-  
 zależnego,  $t_{bz}$  - czas działania wyzwalacza bezzwłoczno-  
 zależnego,  $t_z$  - czas działania wyzwalacza krótkozwłoczno-  
 zależnego



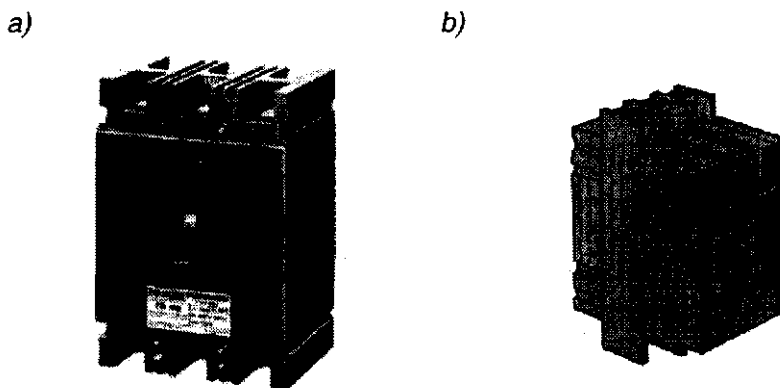
Rys. 11.15. Okrętowe łączniki zwarciove: a) wyłącznik typu DS prod. APENA; wyłącznik typu M20 prod, Merlin Gerin

Wyzwalacze wyłącznika przedstawionego na rys. 11.13 zostały ukazane w formie wykonania tradycyjnego - elektromechanicznego. Współczesne łączniki samoczynne, np. typu DS firmy APENA mają zabezpieczeniowe układy elektroniczne (charakterystyki wyłącznika realizowane przez takie układy są identyczne z charakterystykami wykonania tradycyjnego). Przykłady wykonań takich wyłączników ilustruje rys. 11.15.

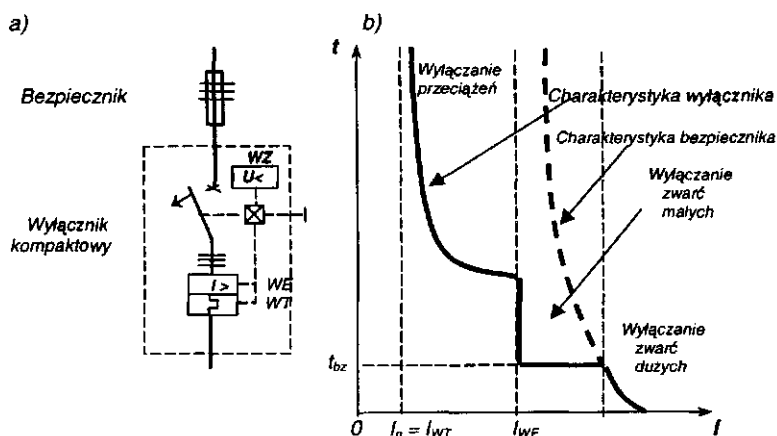
Okrętowe wyłączniki zwarciove budowane są na duże prądy znamionowe (do 4000 A) i dużą zdolność łączeniową zwarciową- 100 ••• 200 kA.

W obwodach, w których występują prądy zwarciove nie większe od 30 kA, stosuje się lekkie wyłączniki zwarciove zwane **wyłącznikami kompaktowymi** (rys. 11.16). Wyłączniki te, również z mechanizmem zamkowym, wyposażane są w podobnie, jak opisane powyżej, działające zabezpieczenia.

Wyłączniki kompaktowe mogą być instalowane również w obwodach z większymi prądami zwarciowymi, ale muszą być wówczas dobezpieczone bezpiecznikami topikowymi. W układzie wyłącznika dobezpieczonego w zakresie i małych prądów zwarciowych działa wyłącznik, zaś duże prądy zwarciove wyłącza] ą bezpieczniki. Schemat wyłącznika dobezpieczonego i charakterystykę  $t-I$  przedstawia rys. 11.17.



Rys. 11.16. Okrętowe wyłączniki kompaktowe: a) wyłącznik typu FB, prod. EMA-ELESTER; b) wyłącznik typu LV prod. Merlin Gerin



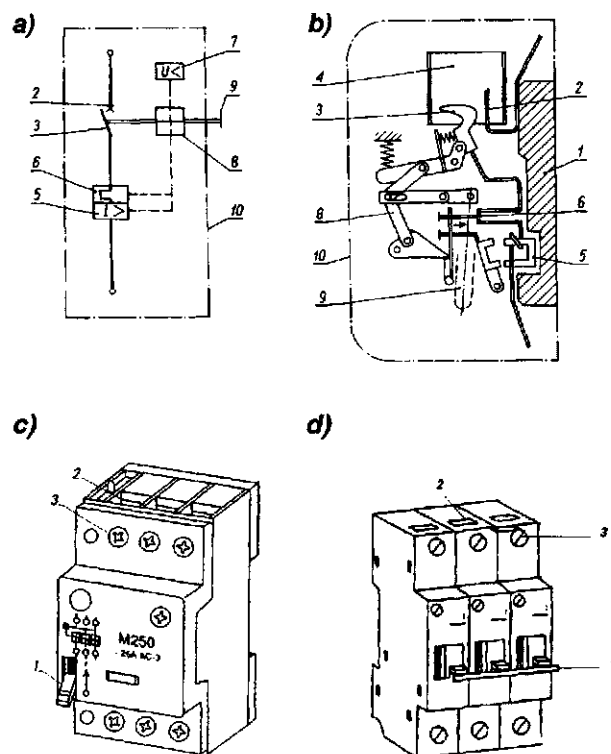
Rys. 11.17. Wyłącznik dobezpieczony:  
 a) schemat dobezpieczenia; b) charakterystyka  $t-I$ ,  
 WE- wyzwalacz bezzwłoczny; WT- wyzwalacz zwłoczny zależny,  
 WZ - wyzwalacz zanikowo-napięciowy, B - bezpiecznik,  
 (oznaczenia prądów i czasów jak na rys. 11.13)

### 11.2.6. Wyłączniki samoczynne instalacyjne i silnikowe

Wyłączniki instalacyjne i wyłączniki silnikowe działają na podobnych zasadach jak łączniki zwarciove. Posiadają napęd tylko ręczny, są znacznie mniejsze i mają mniejsze parametry elektryczne. Zasadę budowy i przykłady rozwiązań wyłączników przedstawiono na rys. 11.18.

Wyłączniki instalacyjne stosuje się do zabezpieczenia obwodów małej mocy, np. oświetleniowych i wykonywane są na prądy znamionowe do 30 A. Wyłączniki silnikowe budowane są na prądy do 63 A i służą do zabezpieczania silników elektrycznych. Od wyłączników instalacyjnych różnią się innym ukształtowaniem charakterystyki /-/, co pozwala tym wyłącznikom przetrzymywać prądy rozruchowe silników.

Wyłączniki instalacyjne i silnikowe przy niewielkich przeciążeniach działają z opóźnieniem zależnym od wielkości prądu, a przy zwarciach wyłączają w czasie 10 •\*- 15 ms (zależnie od rodzaju i wielkości).



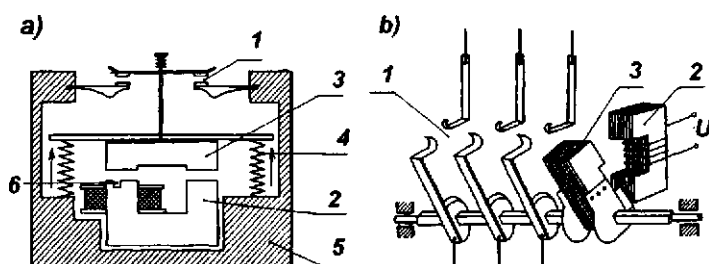
Rys. 11.18. Wyłączniki instalacyjne i silnikowe:

- a) układ połączeń przedstawiający podstawowe elementy składowe; b) szkic budowy;  
 1 - podstawa, 2 - styk stały, 3 - styk ruchomy, 4 - komora gaszeniowa,  
 5 - wyzwalacz elektromagnetyczny, 6 - wyzwalacz termobimetalowy,  
 7 - wyzwalacz podnapięciowy, 8 - zamek, 9 - dźwignia napędu, 10 - obudowa;  
 c) wyłącznik silnikowy typu M250; d) wyłącznik instalacyjny typu S190; 1 -  
 dźwignia napędu, 2 - otwory do wprowadzania przewodów, 3 - śruby zaciskowe

## 11.2.7. Styczniki

**Łączniki stycznikowe (styczniki)** są to łączniki, które w stanie załączenia są utrzymywane przez elektromagnes (w odróżnieniu od wyłączników samoczynnych mających w tym celu zamek mechaniczny). Styczniki są przeznaczone do sterowania silnikami elektrycznymi oraz innymi odbiorami energii elektrycznej, zwłaszcza gdy wymagana jest duża częstość łączeń. Istnieje możliwość realizacji zdalnego sterowania, w tym również sterowania samoczynnego przez zastosowanie odpowiednich czujników reagujących na różne wielkości fizyczne (temperatura, ciśnienie, poziom cieczy itp.)- Te cechy powodują, że styczniki zaliczane są do grupy **łączników manewrowych**. Duża trwałość mechaniczna i łączeniowa sprawiają, że styczniki są stosowane praktycznie we wszystkich układach napędowych. W każdym styczniku można wyróżnić następujące elementy:

- styki główne nieruchome (stałe) i ruchome,
- elektromagnes napędowy z uzwojeniem (cewką),
- styki pomocnicze zwarte i rozwiernie,
- komory łukowe,
- układ konstrukcyjny i obudowa.



Rys. 11.19. Zasada budowy i działania stycznika dwuprzzerwowego (a) i jednoprzzerwowego (b):

- 1 - styki główne, 2 — rdzeń elektromagnesu, 3 — zwora elektromagnesu, 4 - sprężyna zwrotna, 5 - podstawa, 6 - zwój zwarty

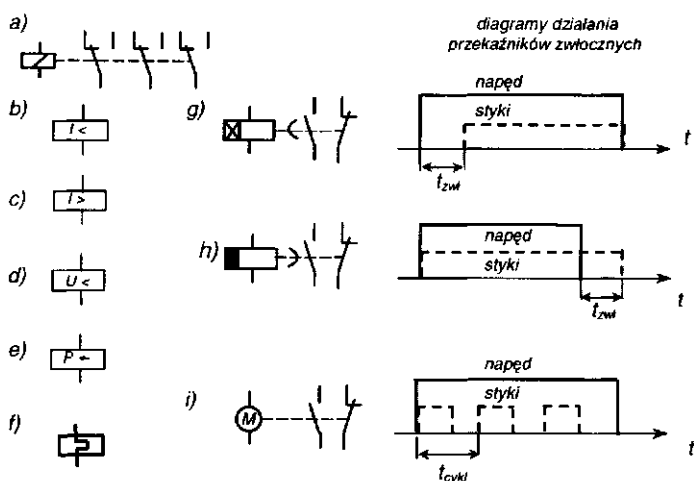
Łączniki stycznikowe pozostają normalnie w stanie otwartym. Doprowadzenie napięcia do cewki elektromagnesu wywołuje ruch zwory elektromagnesu i zamknięcie styków głównych oraz przełączenie styków pomocniczych. Jednocześnie zostają napięte sprężyny zwrotne. Przerwa w zasilaniu obwodu elektromagnesu powoduje samoczynne otwarcie styków głównych pod wpływem sprężyn zwrotnych. Zarys konstrukcji styczników przedstawia rys. 11.19.

Styczniki mogą być sterowane zarówno prądem zmiennym, jak i stałym. Dla zapobieżenia drganiom zwory przy zasilaniu elektromagnesu prądem zmiennym, na części przekroju rdzenia elektromagnesu montuje się zwarty pierścień miedziany.

### 11.2.8. Przekazniki

Przekazniki są łącznikami pracującymi w obwodach sterowania, sygnalizacji i pomiarów. Z tego względu ich styki są przeznaczone do przenoszenia obciążeń nie większych od 5 A. Ze względu na spełnianą funkcję można wyróżnić następujące przekazniki (oznaczenia na rys. 11.20):

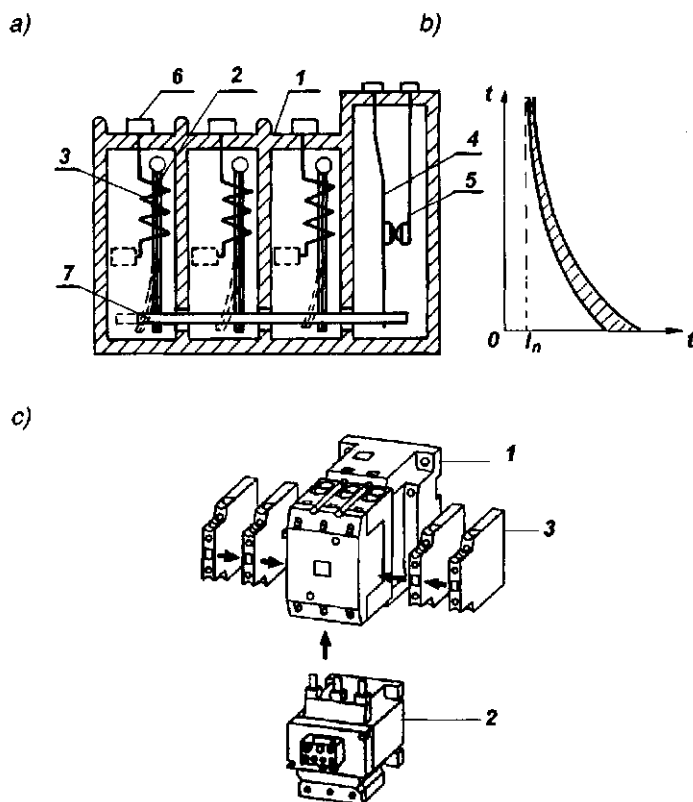
- **pośredniczące** (rys. 11.20 a) składające się z elektromagnesu napędowego i zespołu styków, służące do zwielokrotnienia liczby sygnałów, rozdzielenia galwanicznego obwodów, zmiany parametru sygnału itp.;
- **zabezpieczające** (rys. 11.20 b-f) nadprądowe, podnapięciowe, zwrotnomocowe itd. reagujące na zmianę mierzonego parametru uruchomieniem napędu i zmianą położenia styków;
- **zwłoczne**, nazywane również **czasowymi** (rys. 11.20 g - i) reagujące na włączenie zasilania napędu (lub jego wyłączenie) przełączeniem styków ze zwłoką lub wykonaniem przez styki programu łączy; opóźnienie czasowe w przekazniku może być zrealizowane mechanizmem zegarowym, napędzanym silnikiem lub układem elektronicznym.



Rys. 11.20. Symbole przekazników (obok symboli przekazników zwłocznych czasowe działania,  $t^{\wedge}$  - czas zwłoki):

- a) pośredniczący; b) zanikowo-prądowy; c) nadmiarowo-prądowy; d) zanikowo-napięciowy; e) mocy zwrotnej; f) nadprądowy termobimetalowy; g) czasowy ze zwłoką przy wzbudzeniu; h) czasowy ze zwłoką przy odwzbudzeniu; i) programowy

Bardzo często stosowanym przekaźnikiem zabezpieczającym silniki elektryczne przed przeciążeniem jest przekaźnik termobimetalowy. Zasada działania tego przekaźnika (rys. 11.21) i jego charakterystyka czasowo-prądowa (zależna) są podobne jak wyzwalaczy termobimetalowych stosowanych w łącznikach samoczynnych (por. rozdz. 11.2.5). Przekaźniki termobimetalowe współpracują najczęściej ze stycznikami, przerywając ich wzbudzenie w przypadku przeciążenia silnika (objawiającego się zwiększonym poborem prądu). Przekaźniki termobimetalowe mogą być wówczas montowane ze stycznikami oddzielnie, lub sprężone konstrukcyjnie, tworząc w ten sposób zestaw nazywany wyłącznikiem stycznikowym (rys. 11.21 c).



Rys. 11.21. Przekaźnik termobimetalowy: a) budowa (1 - korpus, 2 - bimetale, 3 - grzejnik, 4 - styk ruchomy, 5 - styk nieruchomy, 6 - zacisk, 7 - dźwignia); b) charakterystyka czasowo-prądowa; c) wyłącznik stycznikowy (1 - stycznik, 2 - przekaźnik termobimetalowy, 3 - zestawy styków pomocniczych)

## 11.3. Zabezpieczenia

Każdy obwód elektryczny powinien posiadać zabezpieczenia **co najmniej przed przeciążeniem i zwarciami**. W poszczególnych przypadkach mogą być zastosowane w miarę potrzeb inne typy zabezpieczeń, np.:

- podnapięciowe (zanikowo-napięciowe),
- różnicowo-prądowe,
- zwrotno-prądowe,
- mocy zwrotnej i inne.

Każde z zabezpieczeń ma zadanie chronić obwód elektryczny wraz z urządzeniami w nim zainstalowanymi **przed skutkami nadmiernego nagrzewania, wystąpienia znacznych sił dynamicznych bądź nieprawidłowej pracy**.

Poniżej zostanie omówionych kilka typowych obwodów w okrętowej sieci elektroenergetycznej.

### 11.3.1. Zabezpieczenia obwodów oświetlenia i ogrzewania

Obwody te w trakcie eksploatacji, przy mocy nominalnej, charakteryzują się praktycznie stałą wartością prądu. Są to obwody bezindukcyjne lub rezystancyjno-indukcyjne (z małym udziałem indukcyjności). Stałość natężenia prądów w normalnych warunkach eksploatacyjnych świadczy o stałej ustalonej wartości wydzielania się ciepła:

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

oraz stałej wartości sił elektrodynamicznych działających na elementy obwodu:

$$F = k \cdot I^2$$

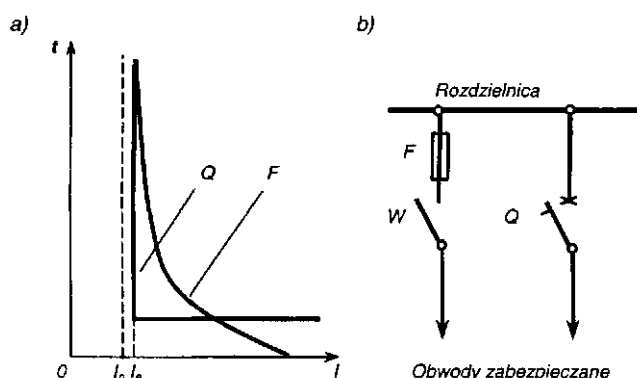
Obydwa te czynniki narażenia obwodu elektrycznego zależą od prądu  $I$ , a zatem, jeżeli nie dopuści się do wzrostu prądu ponad wartość nominalną, to nie wystąpią narażenia i a niedopuszczalne.

Znając charakterystykę pracy obwodu (w naszym przypadku  $I = \text{const}$ ) oraz charakterystyki aparatów elektrycznych, możemy je dobrać w taki sposób, żeby:

- nie wyłączały obwodu w normalnej eksploatacji,
- wyłączały obwód ze zwłoką przy przeciążeniu, gdy  $I > I_n$ ,
- wyłączały obwód w możliwie krótkim czasie przy zwarceniu, gdy  $I \gg I_n$ ,
- urządzenia zabezpieczające miały zdolność wyłączenia  $I_w$  większą od spodziewanego prądu zwarcowego  $I_z$ .



Typowe układy zabezpieczeń obwodu oświetleniowego (bezpiecznik instalacyjny lub wyłącznik instalacyjny) przedstawia rys. 11.22.



Rys. 11.22. Zabezpieczenie obwodu oświetleniowego:  
 a) charakterystyki czasowo-prądowe zabezpieczeń; b) układ aparatów;  
 W- łącznik ręczny, F — bezpiecznik toplukowy o prądzie znamionowym  $I_{nb}$ , Q — wyłącznik instalacyjny o nastawie prądowej  $I_e - 1,05 \cdot I_n$ , (gdzie  $I_n$  - prąd nominalny odbiornika)

### 11.3.2. Zabezpieczenia silnika asynchronicznego klatkowego

Jak wiadomo, silniki asynchroniczne klatkowe (przy najczęściej stosowanym na statku rozruchu bezpośrednim) mają duży prąd rozruchowy  $I_r$ , zaś czas rozruchu  $t_r$  jest zależny od napędzanego urządzenia.

Parametry te w okrętowym systemie elektroenergetycznym w przybliżeniu są następujące:

$$I_r = 6 \cdot I_n$$

$$t_r \leq 0,5 \text{ s}$$

Zastosowanie bezpiecznika toplukowego lub wyłącznika samoczynnego przy doborze jak w obwodzie oświetleniowym, spowodowałoby jego zadziałanie już w pierwszej chwili rozruchu silnika. Zabezpieczenia powinny spełniać następujące wymagania:

- 1) nie wyłączać obwodu w normalnej eksploatacji, tzn. w czasie rozruchu, gdy  $I \sim 6 \cdot I_n$ , i pracy ustalonej, gdy  $I = I_n$ ;
- 2) wyłączyć obwód ze zwłoką w czasie pracy ustalonej przy przeciążeniu, gdy  $I > I_n$ ;
- 3) wyłączyć obwód w możliwie krótkim czasie, gdy  $I \gg I_n$ ;

- 4) wyłączyć obwód, gdy znacznie obniży się napięcie zasilania  $U \ll U_n$  i uniemożliwić uruchomienie się silnika po powrocie napięcia do wartości  $U = U_n$ ;
- 5) urządzenie zabezpieczające powinno mieć zdolność wyłączalną lub wytrzymałość dynamiczną większą od największego spodziewanego prądu w czasie zwarcia.

Powyższe wymagania można zrealizować następująco:

Ad 1 i 2. Zastosować urządzenie o charakterystyce prądowo zależnej (zbliżonej do charakterystyki bezpiecznika) z dużą bezwładnością. Takim urządzeniem jest **przełącznik termobimetalowy**. Nie zdąży on zadziałać przy krótkich czasach prądu rozruchowego, natomiast zadziała przy dłuższym przeciążeniu. Nie zabezpiecza on przed skutkami zwarcia. Nastawiany prąd nominalny przełącznika powinien wynosić:

$$I_{nast.} = (1 \div 1,1) \cdot I_n \quad (11-4)$$

Ad 3. Do ochrony obwodu przed skutkami zwarcia należy zastosować inny aparat o szybkim działaniu, który będzie działał tylko przy  $I \gg I_r$ , i na tyle szybko, żeby nie dopuścić do znacznego przegrzania się urządzeń. Do tego celu bardzo dobrze nadają się **bezpieczniki topikowe**, lecz ich dobór musi uwzględniać następujące kryterium:

$$\begin{aligned} I_n &> I \\ I_n &> \frac{I_r}{\alpha} \end{aligned} \quad (H.5) \quad (11.6)$$

- $I_{nb}$  – prąd nominalny bezpiecznika,
- $I_n$  – prąd nominalny obwodu (silnika),
- $I_r$  – prąd rozruchowy silnika,
- $\alpha$  – współczynnik rozruchu według poniższej tabeli.

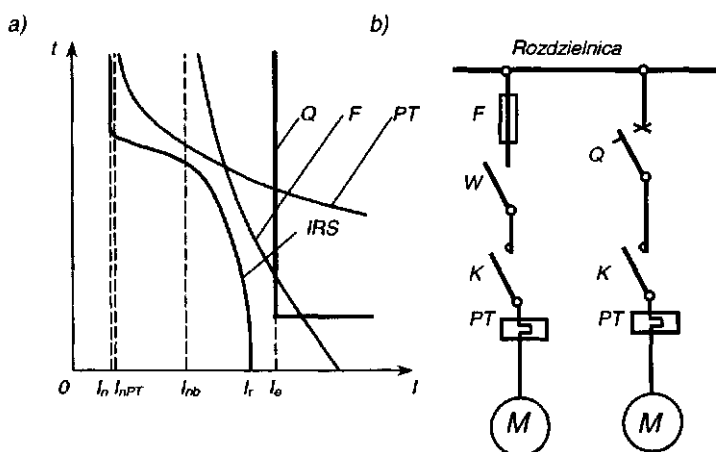
Rodzaj rozruchu	Współczynniki rozruchowe $\alpha$			
	mniej niż 5 rozruchów na dobę		więcej niż 5 rozruchów na dobę	
	wkładka o działaniu szybkim	wkładka o działaniu zwłocznym	wkładka o działaniu szybkim	wkładka o działaniu zwłocznym
Lekki	2,2	3,0	2,0	2,5
Średni	2,0	2,5	1,8	2,0
Ciężki	1,6	1,6	1,5	1,5
Bardzo ciężki	–	–	1,4	1,4

Wyzwalacze lub przekaźniki elektromagnetyczne również mogą być stosowane jako zabezpieczenie zwarciowe, jeśli wyłącznik spełnia warunki zwarciowe. Ponieważ wyzwalacze elektromagnetyczne działają bezzwłocznie (niekiedy z niewielką zwłoką), prąd nastawienia powinien być większy od prądu rozruchowego; zwykle przyjmuje się:

$$I_e \geq 1,2 I_{rm} \quad (11.7)$$

gdzie  $I_e$  - prąd nastawienia wyzwalacza elektromagnetycznego.

Powyższe rozwiązania przedstawiono na rys. 11.23.



Rys. 11.23. Charakterystyki zabezpieczenia (a) i układ aparatów (b) w obwodzie z silnikiem asynchronicznym klatkowym:

W- łącznik ręczny, F- bezpiecznik topikowy o prądzie znamionowym  $I_{nb}$ , K - stycznik, Q - wyłącznik silnikowy o nastawie  $I_r$ , PT- przełącznik termobimetalowy o nastawie  $I_{nPT}$ , IRS - przebieg czasowy prądu rozruchowego silnika,  $I_n$  - prąd nominalny silnika,  $I_r$  - prąd rozruchowy silnika

Ad 4. Wszystkie obwody zasilające silniki elektryczne powinny mieć zabezpieczenie zanikowo-napięciowe. Może to być zrealizowane za pomocą następujących aparatów:

- jeżeli w rozdzielnicy głównej **RG** na odejściu obwodu jest zamontowany wyłącznik samoczynny, to powinien on mieć wbudowany wyzwalacz lub przekaźnik podnapięciowy;
- jeżeli w RG na odejściu obwodu jest zastosowany bezpiecznik topikowy i łącznik ręczny, to dopuszcza się wykorzystanie stycznika jako zabezpieczenia podnapięciowego (realizuje się to przez zasilanie

układu sterowania stycznika z jego obwodu głównego) - takie rozwiązanie powszechnie stosuje się na statkach.

### 11.3.3. Zabezpieczenia prądnic synchronicznych

Prądnice nie przeznaczone do pracy równoległej powinny mieć zabezpieczenia od przeciążenia i zwarcia.

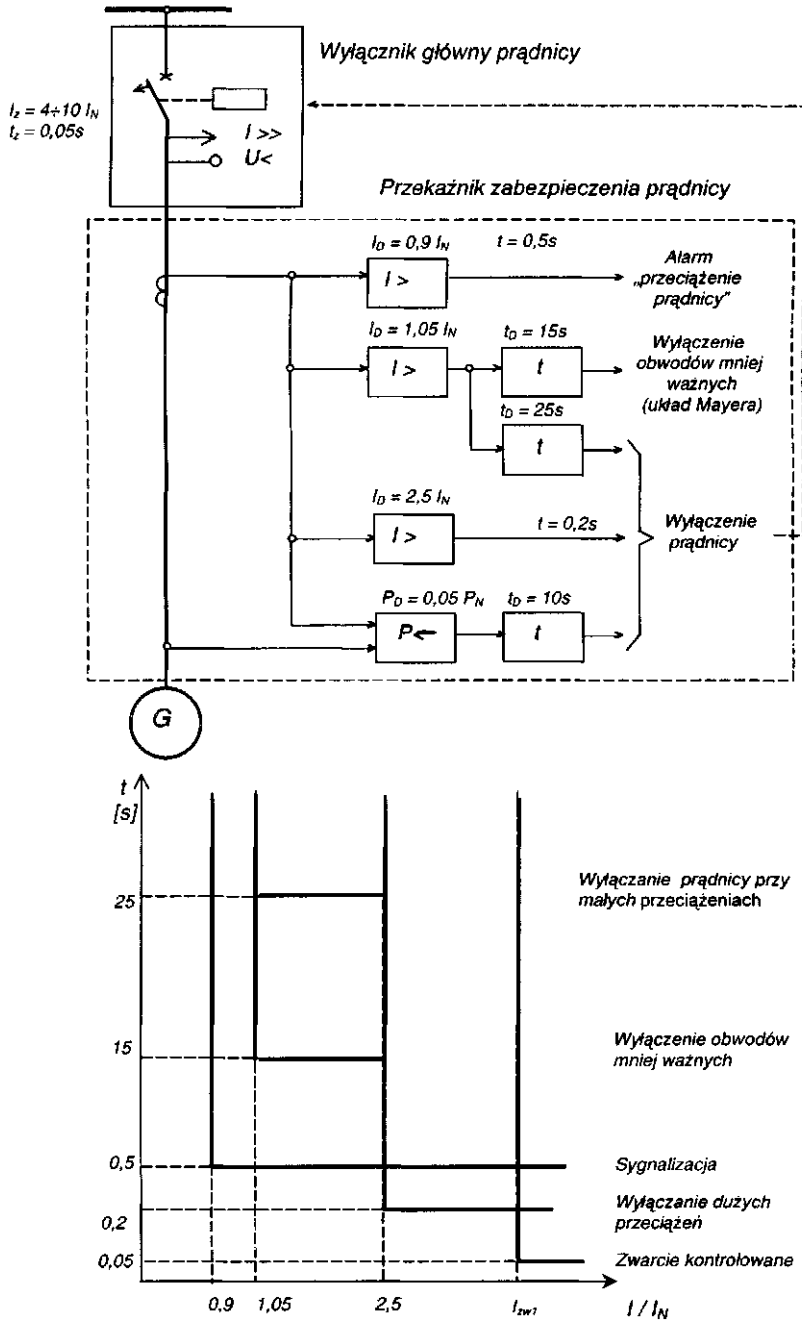
Prądnice przeznaczone do pracy równoległej powinny mieć co najmniej następujące zabezpieczenia:

- 1) przed przeciążeniami,
- 2) przed zwarciami,
- 3) kierunkowe (prądu lub mocy zwrotnej),
- 4) podnapięciowe.

Prądnice okrętowe nie mają zabezpieczeń przed zwarciami doziemnymi (do kadłuba statku) ze względu na bardzo małe prądy takich zwarc. W przypadku wystąpienia zwarcia doziemnego prądnica nie zostaje wyłączona, natomiast zadziałają obwody alarmowe urządzeń do kontroli stanu izolacji (omówione szerzej w rozdziale 15):

Ad 1. Jeżeli wystąpi przeciążenie prądnicy w granicach  $I = (0,95 \text{ H- } I_n) / I_n$ , to powinna zadziałać bezzwłocznie sygnalizacja optyczna i akustyczna przeciążenia (w niektórych rozwiązaniach stosuje się zwłokę czasową do 15 min). Przy dalszym zwiększaniu się obciążenia w granicach  $I = (1,05 \text{ -s- } 1,5) / I_n$ , powinny odłączyć się obwody mniej ważnych odbiorników (tzw. zabezpieczenia przeciążeniowe Mayera, potocznie - układ Mayera) ze zwłoką czasową np. 15 s. Jeżeli po wyłączeniu obwodów mniej ważnych nie zlikwiduje się przeciążenia, to po dalszej zwłoce czasowej, np. 20 s, prądnica powinna wyłączyć się samoczynnie. Jeżeli wystąpi znaczne przeciążenie  $I > 1,5 \cdot I_n$ , zabezpieczenie powinno odłączyć prądnicę w czasie możliwie najkrótszym, jednak z uwzględnieniem wybiórczości zabezpieczeń. Wymagania tych zabezpieczeń przeciążeniowych zrealizowane są najczęściej członami nadprądowymi i czasowymi **przełącznika zabezpieczenia prądnicy** (blokowy schemat działania tego przełącznika i jego charakterystyki czasowo-prądowe przedstawia rys. 11.24).

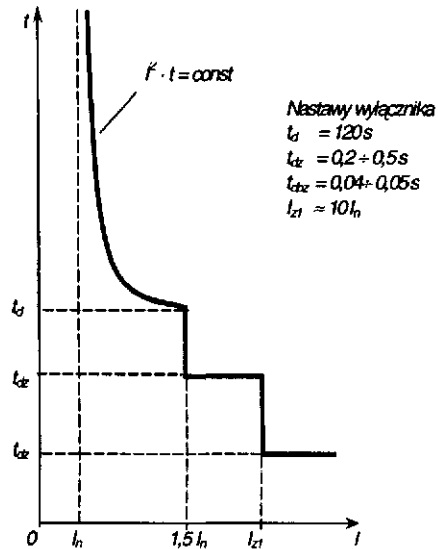
Ad 2. Jeżeli wystąpi zwarcie  $I \gg I_n$ , (przy czym  $I > I_{z1}$ , gdzie  $I_{z1}$  - prąd zwarcia jednej prądnicy), prądnica powinna być odłączona bezzwłocznie. Wymaganie to najczęściej realizuje się przez wyłączenie prądnicy łącznikiem zwarciovym (wyłącznikiem prądnicy). Charakterystykę  $t-I$  wyłącznika prądnicy przedstawia rys. 11.25.



Rys. 11.24. Blokowy schemat działania i charakterystyki  $t-I$  przełącznika zabezpieczenia prądu

Ad 3. W przypadku skrajnie nierównomiernego rozplywu mocy pomiedzy równolegle pracujace prądnice, gdy jedna z nich bedzie pracowala jako silnik, tzn. bedzie pobierala moc z rozdzielnicy glownej, wówczas powinna byc odlaczona w czasie  $t_d$  (zazwyczaj 5 s), gdy moc zwrotna  $P_z$  wynosi:

$$P_z \geq (8 \div 15\%) P_n \quad (11-8)$$



Rys. 11.25. Charakterystyka  $t-I$  wyłącznika głównego prądnicy:  $I_n$  - prąd znamionowy prądnicy,  $I_{z1}$  - prąd zwarcia jednej prądnicy

Ad 4. Zabezpieczenie podnapięciowe prądnic synchronicznych jest realizowane przez wyzwalacz podnapięciowy wyłącznika głównego prądnicy. Wymagania stawiane przez PRS są następujące:

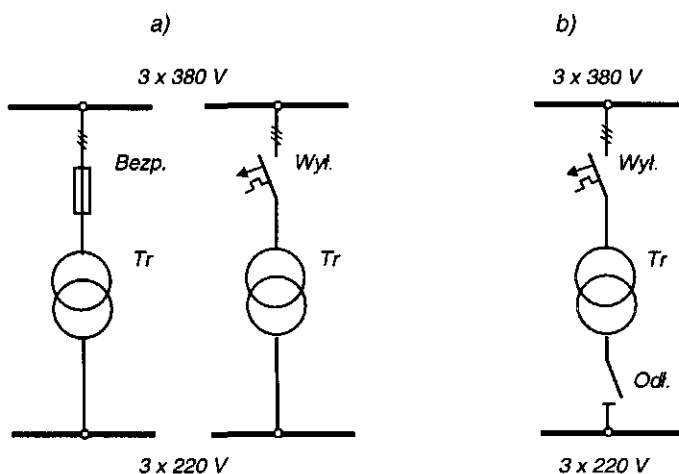
$$U = (1 + 0,85)U_n \quad - \text{praca bez zakłóceń,}$$

$$U = (0,7 + 0,35)U_n \quad - \text{wyłączyć prądnicę.}$$

Zabezpieczenie to powinno również uniemożliwić załączenie prądnicy na szyny głównej tablicy rozdzielczej, dopóki nie nastąpi jej wzbudzenie przynajmniej do napięcia równego 80% wartości znamionowej.

### 11.3.4. Zabezpieczanie transformatorów elektroenergetycznych

Transformatory pracujące w okrętowych niskonapięciowych (380/220 V) układach elektroenergetycznych nie przekraczają na ogół mocy 150 kVA. Z tego względu są zabezpieczane tylko przed zwarciami i przeciążeniami wyłącznikami samoczynnymi lub bezpiecznikami od strony pierwotnej (rys. 11.26) oraz wyposażane w urządzenia do kontroli stanu izolacji. Jeżeli transformatory przeznaczone są do pracy równoległej, konieczne jest stosowanie odłączników po stronie wtórnej (rys. 11.26 b).

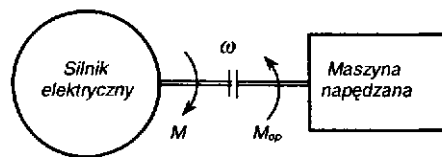


Rys. 11.26. Zabezpieczanie transformatorów elektroenergetycznych:  
a) zabezpieczanie transformatorów pracujących samotnie, b)  
zabezpieczanie transformatorów przeznaczonych do pracy równoległej

## 12. Napęd elektryczny 12.1.

### Równanie ruchu napędu

Napędem elektrycznym przyjęto nazywać zespół napędowy złożony z jednego lub kilku silników elektrycznych (z aparaturą rozruchową, regulacyjną, zabezpieczającą itp.), elementów przeniesienia napędu (sprzęgła, przekładnie) i jednej lub kilku maszyn napędzanych. Napęd elektryczny dowolnego urządzenia polega na dostarczeniu do niego mocy  $P$ , przy odpowiednich parametrach momentu elektromagnetycznego silnika  $M$ , momentu oporowego maszyny napędzanej  $M_{op}$  i prędkości obrotowej ( $\omega$  układu napędowego) (rys. 12.1).



Rys. 12.1. Struktura napędu elektrycznego

W warunkach **pracy ustalonej napędu** momenty te muszą być sobie równe:

$$M = M_{op} \quad (12.1)$$

W warunkach rozruchu czy hamowania, lub w **stanach przejściowych**, zależności te nie są tak proste. Różnicę wartości momentów w stanach przejściowych nazywamy **momentem dynamicznym**, który może być dodatni lub ujemny:

$$M_d = M - M_o \quad (12.2)$$

Zagadnienie to opisuje równanie dynamiki napędów:

$$M - M_{op} = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \cdot \frac{dJ}{dt} \quad (12.3)$$



gdzie:

$J$  - moment bezwładności układu napędowego:

$$J = \sum_1^n m_i \cdot r_i^2 \quad (12.4)$$

$m$  - masa ciała,

$r$  - promień bezwładności,

$\frac{d\omega}{dt}$  - przyrost prędkości obrotowej (przyspieszenie),

$\frac{dJ}{dt}$  - przyrost momentu bezwładności układu napędowego.

W większości przypadków moment bezwładności  $J = \text{const}$ , a więc:

$$\frac{dJ}{dt} = 0$$

Wzór (12.3.) przyjmie więc postać:

$$M_d = J \frac{d\omega}{dt} \quad (12.5)$$

Rozpatrując równanie momentu dynamicznego, dochodzimy do wniosku, że w napędzie mogą wystąpić następujące stany:

a) gdy  $M = M_{op}$  to  $M_d = 0$  i  $\frac{d\omega}{dt} = 0$

oznacza to, że ustalona prędkość obrotowa ( $\omega = \text{const}$ ) występuje tylko wtedy, gdy moment napędowy  $M$  jest równy momentowi oporowemu urządzenia  $M_{op}$

b) gdy  $M > M_{op}$  to  $M_d > 0$  i  $\frac{d\omega}{dt} > 0$

oznacza to, że w czasie rozruchu moment napędowy  $M$  musi być większy od momentu oporowego urządzenia  $M_{op}$

c) gdy  $M < M_{op}$  to  $M_d < 0$  i  $\frac{d\omega}{dt} < 0$

oznacza to, że układ napędowy zmniejsza prędkość obrotową, czyli jest hamowany lub będzie poruszał się w kierunku przeciwnym do momentu silnika napędowego.

## 12.2. Rodzaje pracy maszyn elektrycznych

Charakter pracy urządzeń napędzanych przez silniki może być bardzo różny. Niektóre z tych urządzeń pracują w sposób ciągły, inne pracują cyklicznie, lub są włączane sporadycznie. Warunki nagrzewania się silników na skutek występujących w nich strat mocy są różne w poszczególnych rodzajach pracy. Dla ułatwienia doboru maszyn do napędów znormalizowano rodzaje pracy maszyn elektrycznych. Normy przewidują osiem rodzajów pracy oznaczanych jako 51 do 58.

**Praca ciągła S1** - charakteryzuje się dowolnie długim czasem pracy, przy czym temperatura silnika nie przekracza temperatury dopuszczalnej. Przykładem pracy ciągłej są napędy wentylatorów, pomp itp.

**Praca dorywcza S2** - silnik pracuje przez czas, w którym jeszcze nie osiągnie temperatury ustalonej. Czas wyłączenia natomiast jest na tyle długi, że silnik ostygnie do temperatury otoczenia. Typowym napędem o pracy dorywczej jest wciągarka kotwiczna. Przy pracy dorywczej S2 określona jest nie tylko moc napędu, lecz i czas pracy, np. S2 30. Oznacza to, że urządzenie nie powinno pracować dłużej niż 30 minut, gdyż w przeciwnym wypadku nagrzej się nadmiernie. Silniki do pracy dorywczej mają znormalizowany czas pracy wynoszący 10, 30, 60 i 90 minut.

**Praca przerywana 53** - silnik pracuje w cyklu przerywanym, w taki sposób, że w czasie pracy nie nagrzewa się do temperatury ustalonej, a w czasie przerwy nie zdąży ostygnąć do temperatury otoczenia. Typowymi napędami o pracy przerywanej są napędy obrabiarek. Przy pracy przerywanej 53 określa się oprócz mocy napędu tzw. **względny czas pracy** podawany w procentach:

$$\varepsilon_{\%} = \frac{t_p}{t_p + t_o} \cdot 100\% = \frac{t_p}{T} \cdot 100\% \quad (12.6)$$

$t_p$  - czas pracy,

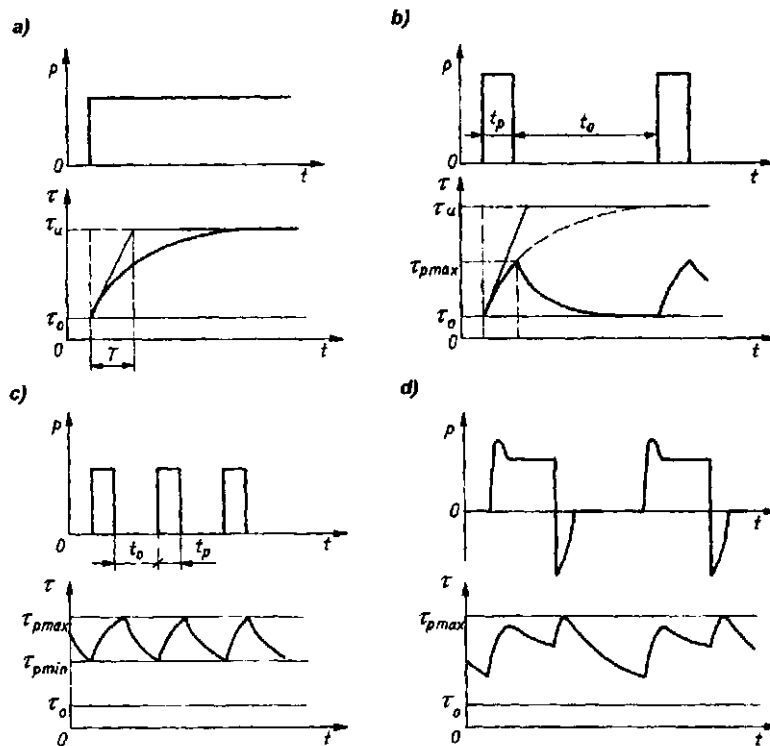
$t_o$  - czas przerwy,

$T$  - czas cyklu ( $T = t_p + t_o$ ).

Silniki do pracy przerywanej mają znormalizowany względny czas pracy wynoszący 15, 25, 40 i 60%.

Rodzaje pracy S4 i 55 dotyczą pracy przerywanej z dużą liczbą łączeń i hamowaniem elektrycznym (typowe dla napędów dźwignicowych); praca 56 określa pracę przerywaną z przerwami, w czasie których silnik pracuje w stanie biegu jałowego (spawarki). Rodzaje pracy 57 i 58 dotyczą pracy długotrwałej z dużą liczbą łączeń i hamowaniem elektrycznym oraz okresową zmianą prędkości obrotowej.

Powyższe rodzaje pracy ilustruje rys. 12.2.



Rys. 12.2. Przykłady rodzajów pracy maszyn elektrycznych:

a) praca ciągła S; b) praca dorywcza 52; c) praca przerywana 53; d) praca przerywana 55;

$P$  - moc rozwijana przez silnik,  $T$  - temperatura silnika,  $t$  - czas,

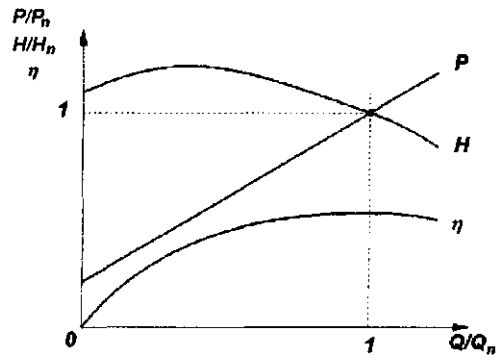
$T$  - stała czasowa nagrzewania się silnika

## 12.3. Przykłady rozwiązań okrętowych napędów elektrycznych

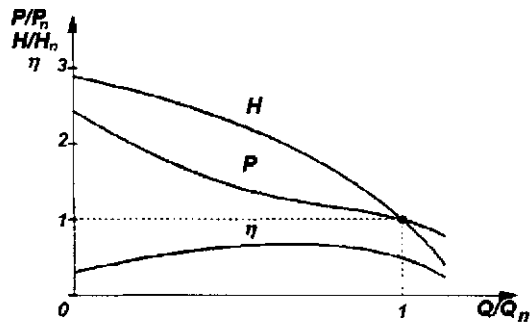
### 12.3.1. Napęd pomp i wentylatorów wirowych

W początkowym okresie rozruchu, mechanizmy posiadają moment oporowy równy momentowi tarcia statycznego, który zwykle wynosi około 10% znamionowego momentu oporowego. Dalsze narastanie momentu oporowego zależy od rodzaju wentylatora lub pompy oraz od położenia zaworów.

Po zakończeniu rozruchu dalsza praca pomp i wentylatorów odbywa się zwykle przy długotrwałej pracy ustalonej. Dla zobrazowania wpływu wydajności pompy  $Q$  na pozostałe parametry pomp odśrodkowych i śmigłowych przedstawiono je na rys 12.3 i 12.4.



Rys. 12.3. Charakterystyki pomp odśrodkowych:  $Q$  - wydajność,  $H$  - ciśnienie,  $P$  - pobór mocy,  $\eta$  - sprawność



Rys. 12.4. Charakterystyki pomp śmigłowych:  $Q$  - wydajność,  $H$  - ciśnienie,  $P$  - pobór mocy,  $\eta$  - sprawność

Przy zmianie prędkości obrotowej pompy lub wentylatora, zmienia się wydajność  $Q$ , ciśnienie  $H$ , pobór mocy  $P$  i moment obciążenia  $M$ . Jeżeli urządzenia te pracują bez przeciwnienia, wymienione wartości zmieniają się w funkcji prędkości obrotowej następująco:

$$Q = c_1 \cdot n \quad (12.7)$$

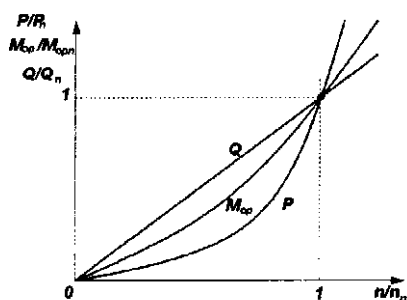
$$H = c_2 \cdot n^2 \quad (12.8)$$

$$P = c_3 \cdot n^3 \quad (12.9)$$

$$M = c_4 \cdot n^2 \quad (12.10)$$

gdzie  $c_1, c_2, c_3, c_4$  – stałe.

Zależności te obrazuje rys. 12.5.



Rys. 12.5, Zmiana parametrów pompy w funkcji prędkości obrotowej (pominięto moment tarcia  $M_t$ ):  $Q$  - wydajność,  $P$  - pobór mocy,  $M$  - moment oporowy

Przedstawione wykresy (rys. 12.3, 12.4 i 12.5) obrazują sposób postępowania z napędem zarówno w czasie rozruchu, jak i pracy ustalonej.

Z charakterystyk pompy odśrodkowej (rys. 12.3) wynika, że przy małym przeciwnościeniu, a tym samym i dużym wydatku, zapotrzebowanie na moc jest duże. Oznacza to, że **przy pompach i wentylatorach odśrodkowych rozruch należy dokonywać przy zamkniętym zaworze na wylocie.**

Z charakterystyki pompy śmigłowej (osiowej, rys. 12.5) wynika, że przy małym przeciwnościeniu, a tym samym dużym wydatku, zapotrzebowanie na moc jest małe. Oznacza to, że **przy pompach i wentylatorach osiowych rozruch należy dokonywać przy otwartym zaworze na wylocie.**

Wiemy z poprzednich rozdziałów, że moc układu napędowego w ogólnym przypadku wynosi:

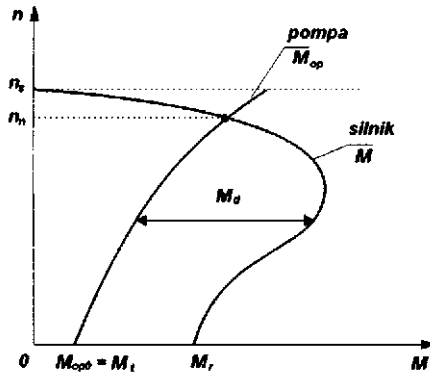
Przy pompach i wentylatorach moc zapotrzebowaną określamy z zależności:

$$P = \frac{Q \cdot H \cdot \gamma}{\eta}$$

gdzie:

- $Q$  - wydajność [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],
- $H$  - wysokość tłoczenia [m],
- $\gamma$  - ciężar właściwy czynnika [ $\text{N}/\text{m}^3$ ],
- $\eta$  - sprawność.

Do napędu pomp i wentylatorów na statkach, w przeważającej większości, stosuje się silniki asynchroniczne klatkowe. Współpracę tych silników z pompą lub wentylatorem obrazuje rys. 12.6.



Rys. 12.6. Współpraca silnika asynchronicznego klatkowego z pompą:  $n_s$  - prędkość synchroniczna,  $n_n$  - prędkość znamionowa (ustalona),  $M_{op0}$  - moment oporowy początkowy,  $M_r$  - moment rozruchowy silnika,  $M_d$  - moment dynamiczny

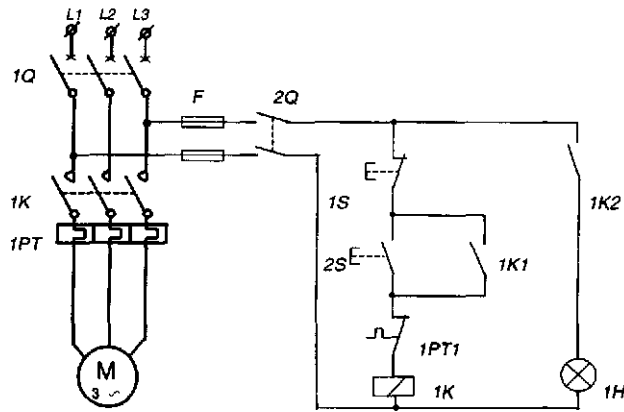
W całym zakresie obrotów w czasie rozruchu od  $n = 0$  do  $n = n_n$  istnieje nadwyżka momentu napędowego nad oporowym, tzn. że  $M_d > 0$ .

Rozruch następuje przy znacznym momencie dynamicznym, a co za tym idzie przy znacznym przyśpieszeniu. Czas rozruchu trwa bardzo krótko i wynosi  $t_r = 0,1$  do  $0,5$  s. Schemat zasilania i sterowania prostym napędem pompy pokazano na rys. 12.7.

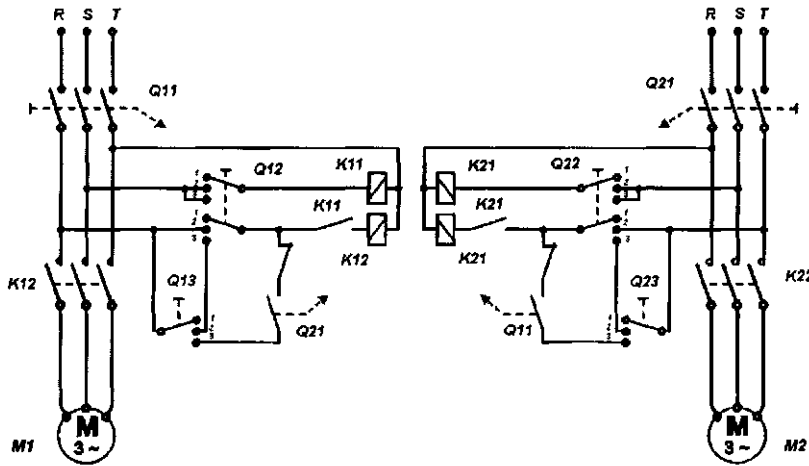
W układzie hydraulicznym sterowania maszyny sterowej interesujący jest napęd i sterowanie dwóch agregatów pompowych o zmiennej wydajności.

Napęd pomp i ich praca w stanach przejściowych i ustalonych niewiele różni się od omówionych powyżej w niniejszym rozdziale, natomiast urządzenie sterowe jako mechanizm ważny dla bezpieczeństwa statku, musi mieć dużą niezawodność pracy w różnych warunkach eksploatacyjnych. Z tych względów stosuje się 100% rezerwę mocy i zasilania.

Dwa napędy pracujące na jeden mechanizm wykonawczy powinny mieć możliwość pracy pojedynczej ze sterowaniem ręcznym lub automatyczną zmianą zasilania oraz pracą dwóch napędów. Przykład takiego rozwiązania pokazano na rys. 12.8.



Rys. 12.7. Schemat zasilania i sterowania silnikiem elektrycznym klatkowym:  
 1Q - wyłącznik samoczynny w obwodzie głównym, 1A<sup>1</sup> - wyłącznik stycznikowy,  
 2Q - wyłącznik ręczny w obwodzie sterowania, 1PT - przekaźnik termobimetalowy,  
 F - bezpieczniki topikowe w obwodzie sterowania, 1H - lampka sygnalizacyjna,  
 1S - przycisk sterowniczy wyłączający, 2S - przycisk sterowniczy załączający



Rys. 12.8. Zasilanie i sterowanie napędów pomp elektrohydraulicznej maszyny sterowej:  
 Q1, Q2 - łączniki ręczne, Q12, Q22 - przełączniki wyboru miejsca sterowania pompy,  
 Q13, Q23 - przełączniki rodzaju pracy, K11, K21 - przekaźniki pomocnicze,  
 K12, K22 - styczniki, M1, M2 - silniki napędowe pomp

Położenia łączników wyboru miejsca sterowania pompy Q12, Q22:

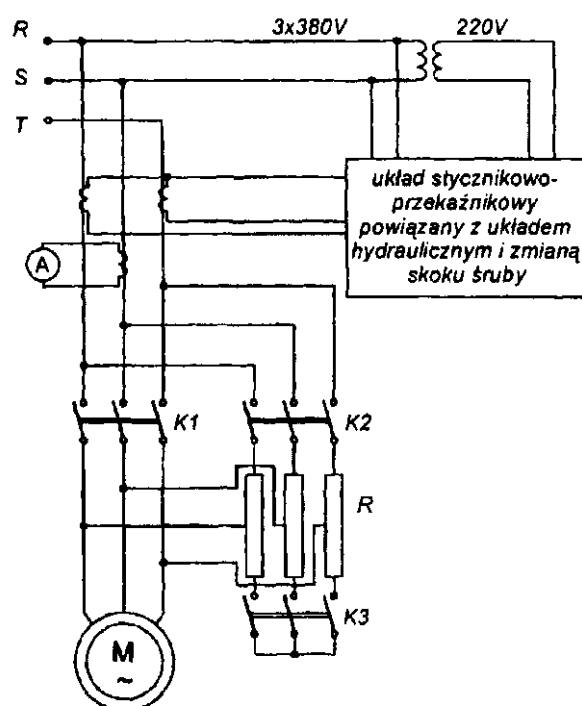
1 - wyłączone, 2 - załączone, sterowanie lokalne, 3 - załączone, sterowanie zdalne.

Położenia łączników wyboru pompy Q13, Q23:

1 - wyłączone, 2 - praca samodzielna, 3 - automatyczne przełączanie pomp

### 12.3.2. Napęd sterów strumieniowych

Stery strumieniowe są na współczesnych statkach największymi odbiornikami energii elektrycznej (poza silnikami napędu głównego na statkach z napędem zelektryfikowanym). Są to napędy o mocy od 300 do 2000 kW. Najczęstsze rozwiązanie napędu steru strumieniowego spotykane współcześnie to silnik asynchroniczny klatkowy, pracujący ze stałą prędkością obrotową (regulacja strumienia wody przepływającej przez urządzenie sterowe odbywa się na drodze zmiany kąta natarcia łopat śruby steru). Rozruch silnika steru odbywa się najczęściej przez autotransformator ograniczający prąd rozruchowy (por. rozdz. 8.2.4) lub przez włączanie rezystorów w obwód stojana. Przykład napędu steru strumieniowego polskiej produkcji przedstawia rys. 12.9.



Rys. 12.9. Uproszczony schemat napędu steru strumieniowego prod. ELMOR: *K1* - stycznik główny silnika, *K2*, *K3* - styczniki rozruchowe, *R* - rezystory rozruchowe



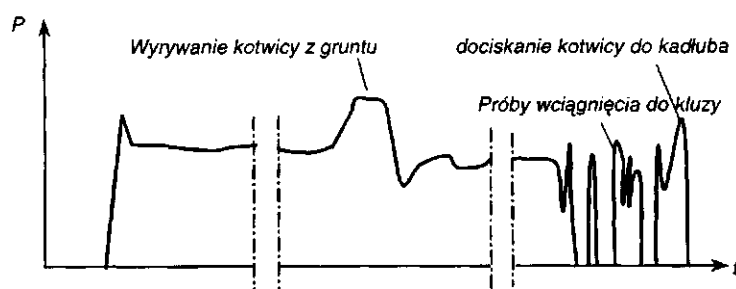
### 12.3.3. Napęd wciągarek kotwicznych

Wciągarka kotwiczna (lub wciągarka kotwiczno-cumownicza jeżeli używana jest również do operacji cumowania) na większości statków jest napędzana wielobiegowym silnikiem asynchronicznym.

Rzucanie kotwicy odbywa się przeważnie bez udziału napędu (odhamowuje się koła łańcuchowe i łańcuch z kotwicą opada pod własnym ciężarem) z wyjątkiem kotwiczenia na dużych głębokościach, kiedy silnik wciągarki należy włączyć jako hamulec zapobiegający zbyt dużej prędkości wysuwania się łańcucha. W czasie wybierania kotwicy, czynności które się wykonuje, można podzielić na kilka etapów:

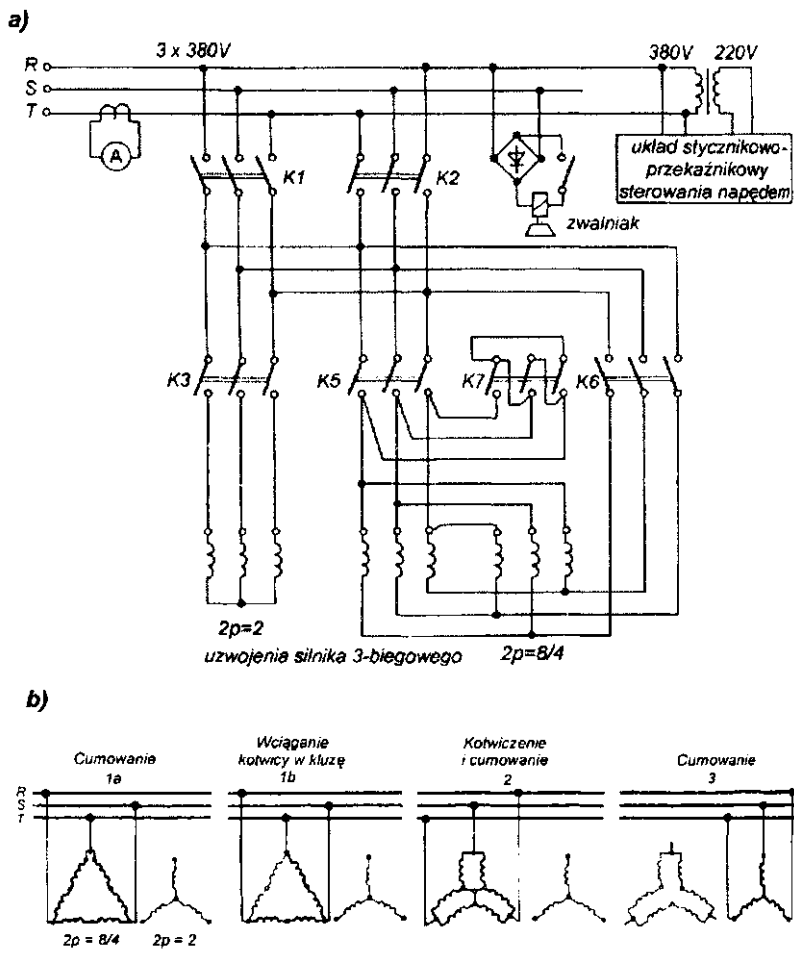
- wybieranie łańcucha leżącego na dnie (obciążenie praktycznie niezmienne);
- wybieranie łańcucha przy rosnącym naprężeniu (ściągnięcie statku nad kotwicę);
- wyrwanie kotwicy z gruntu (może być wykonywane z pomocą napędu głównego statku) - największe obciążenia;
- wybieranie łańcucha z kotwicą (aż w pobliże kluzy); wciągarkę zatrzymuje się kilkakrotnie dla sprawdzenia ułożenia łańcucha;
- wciąganie kotwicy do kluzy i jej dociśnięcie; odbywa się to na bardzo małej prędkości w celu zapobieżenia uszkodzeniom burty i kotwicy; w przypadku złego wciągania kotwicy w kluzę czynność powtarza się nieraz kilkakrotnie.

Z opisanych czynności wynika, że przebieg obciążenia na silniku wciągarki kotwicznej jest bardzo zmienny w czasie i występują kilkakrotne uderzenia obciążeniowe (rys. 12.10). Ze względu na stosunkowo krótki czas operacji silnik wciągarki jest przystosowany do pracy dorywczej (30-minutowej). Silnik powinien wytrzymać po 30 minutach pracy 30-sekundowy postój w stanie zahamowania. Moment znamionowy silnika nie powinien być mniejszy od momentu znamionowego wciągarki.

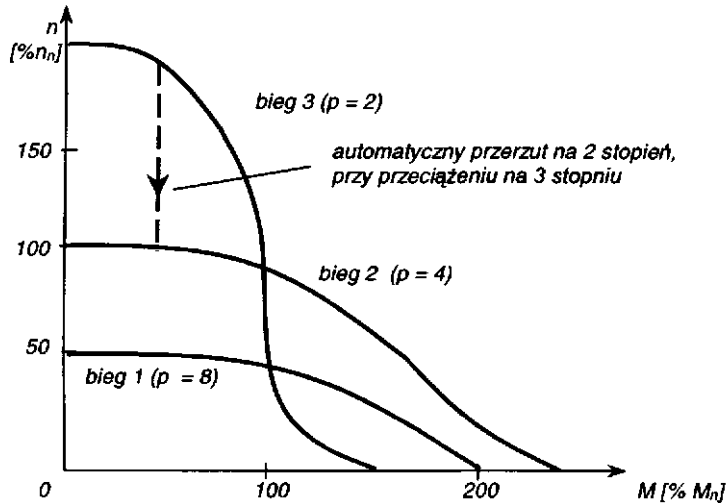


Rys. 12.10. Przebieg obciążenia silnika wciągarki kotwicznej w czasie wybierania kotwicy

Współczesne wciągarki kotwiczno-cumownicze polskiej produkcji są napędzane silnikami asynchronicznymi trójbiegowymi z chłodzeniem (charakterystyki na rys. 12.11) wymuszonym dodatkowym wentylatorem. Silnik ma wbudowane czujki temperaturowe w poszczególnych uzwojeniach. Ponadto uzwojenie trzeciego biegu zabezpieczone jest przełącznikiem nadprądowym, który w przypadku przeciążenia spowoduje przełączenie silnika na mniejszą prędkość. Przeciążenie silnika na niższych biegach powoduje wyłączenie silnika, ale jest możliwe jego ponowne uruchomienie w celu dokończenia operacji (specjalny przycisk awaryjny). Uproszczony schemat napędu wciągarki kotwicznej przedstawia rys. 12.11.



Rys. 12.11. Uproszczony schemat napędu wciągarki kotwiczno-cumowniczej:  
a) schemat obwodu głównego; b) połączenia uzwojeń trójbiegowego silnika klatkowego dla poszczególnych prędkości napędu



Rys. 12.12. Charakterystyki mechaniczne trójbiegowego silnika wciągarki kotwicznej

### 12.3.4. Napęd wciągarek ładunkowych

Napędy wciągarek charakteryzują się przerywanym rodzajem pracy. Wspólną cechą wciągarek jest ograniczona, zwykle krótka droga poruszania się ładunku, a więc krótki czas pracy silnika, po czym musi nastąpić wyłączenie, a kolejnym etapem będzie ruch w przeciwnym kierunku.

**Moment napędu wciągarki** nie zależy od prędkości obrotowej, lecz od wielkości podnoszonego lub opuszczanego ciężaru.

W najprostszym przypadku moment oporowy  $M_{\text{podn}}$  [Nm] przy podnoszeniu ładunku jest równy:

$$M_{\text{podn}} = \frac{G \cdot D}{2 \cdot \eta \cdot i} \quad (12.12)$$

zaś moment oporowy  $M_{\text{ham}}$  przy opuszczaniu ładunku wynosi:

$$M_{\text{ham}} = \frac{G \cdot D}{2 \cdot i} \cdot \eta \quad (12.13)$$

gdzie:

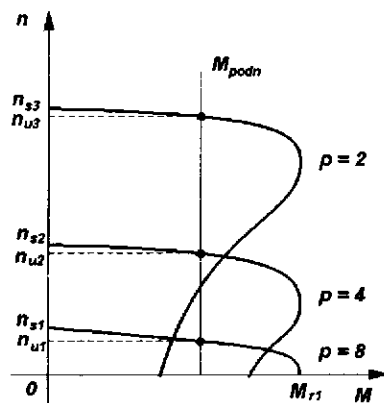
- $G$  - siła pochodząca od ciężaru ładunku [N],
- $D$  - średnica bębna [m],
- $i$  - całkowite przełożenie przekładni i zbloca,
- $\eta$  - całkowita sprawność przełożenia.

Z tych względów napędy wciągarek powinny spełniać następujące wymagania:

- 1) moment rozruchowy  $M > M_{podn}$ ;
- 2) moment hamujący napędu  $M_h > M_{ham}$ ;
- 3) prędkości podnoszenia i opuszczania:
  - a) mała prędkość przy naprężaniu lin stropowych i ustawiania ładunku,
  - b) prędkość robocza,
  - c) prędkość duża dla haka nieobciążonego;
- 4) zmiana kierunku obrotów.

Wymagania te są niemożliwe do zrealizowania silnikami asynchronicznymi klatkowymi z jedną prędkością obrotową zasilanymi bezpośrednio z sieci, a stosowanie energoelektronicznych przetworników częstotliwości mija się z celem ze względu na ich koszt oraz niepotrzebną w tych warunkach płynną regulację prędkości.

Najczęściej do napędu wciągarek okrętowych stosuje się silniki asynchroniczne z wirnikiem klatkowym ze skokową regulacją prędkości obrotowej zrealizowaną za pomocą przełączania liczby par biegunów uzwojeń stojana (a więc silnikami wielobiegowymi). Współpracę takiego silnika z wciągarką pokazano na rys. 12.13.

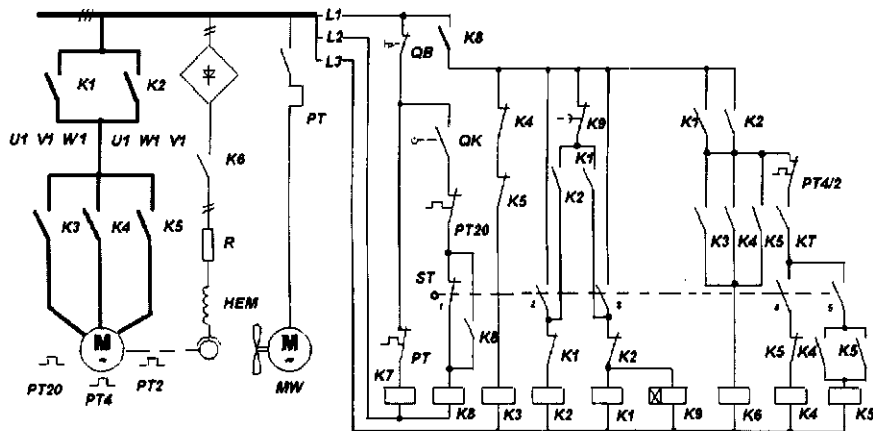


Rys. 12.13. Współpraca silnika asynchronicznego klatkowego 3-biegowego z wciągarką o momencie  $M_{podn}$

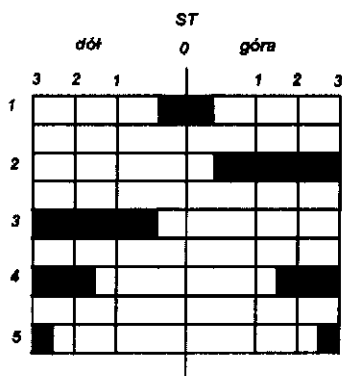
Moment hamujący napędu  $M_{eh}$  realizuje się dobudowując na silniku elektrycznym elektromagnetyczny hamulec o działaniu ciernym. Jego zadanie polega na hamowaniu całego napędu, gdy silnik elektryczny jest wyłączony. W chwili włączenia silnika już na pierwszy bieg, cewka elektromagnesu odciągnie zworę, odhamowując cały układ napędowy.

Przykładowy układ takiego napędu pokazano na rys. 12.14.

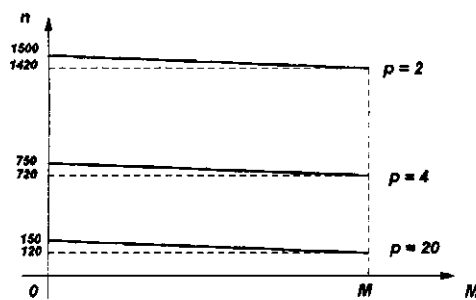
a)



b)



c)



Rys. 12.14. Układ napędu wciągarki silnikiem wielobiegowym:

- a) schemat; b) schemat łączy sterownika; c) charakterystyki prędkości obrotowej;  
*K1, K2* - styczniki kierunku obrotów; *K3, K4, K5* - styczniki stopni prędkości obrotowej; *K6* - stycznik hamulca elektromagnetycznego HEM; *K7* - stycznik wentylatora; *K8* - stycznik pomocniczy, *K9* - przekaźnik zwłoczny hamowania, *QB* - przycisk bezpieczeństwa; *QR* - łącznik krańcowy na klapie wentylacyjnej; *ST* - sterownik; *PT* - przekaźnik termobimetalowy silnika wentylatora; *PT20 PT4 PT2* - czujki temperaturowe uzwojeń silnika wciągarki

W schemacie pokazanym na rys. 12.14 silnik wciągarki jest chłodzony dodatkowym wentylatorem *MEW*. Układ sterowania wciągarki nie może działać, jeżeli kłapa wentylatora jest zamknięta (otwarty łącznik krańcowy *QK*) sterowanie układem odbywa się za pomocą sterownika *ST*. Układ sterowania w razie awarii może być wyłączony przyciskiem bezpieczeństwa *QB*. Silnik wciągarki jest zabezpieczony przed przeciążeniem czujkami termometrycznymi *P720*, *PT4* i *PT8* (zainstalowanymi w uzwojeniach silnika). Przekaznik zwłoczny *K9* zabezpiecza silnik przed zbyt szybkim nawrotem.

### 12.3.5. Napęd wirówki

Wirówki ze względu na bardzo duży moment bezwładności są specyficznym urządzeniem wymagającym innego rozwiązania konstrukcyjnego napędu. Gdybyśmy zrealizowali napęd bezpośredni silnikiem asynchronicznym klatkowym, to pamiętając o równaniu dynamiki napędu:

$$M - M_{op} = J \frac{d\omega}{dt}$$

i dużym momencie bezwładności, musieliśmy zdecydować się na silnik elektryczny o dużym momencie  $M$ , który byłby niewykorzystany przy pracy ustalonej, lub zgodzić się na bardzo małe przyśpieszenie. W tym drugim przypadku wystąpiłoby silne przeciążenie silnika przez cały długi okres rozruchu. Oba te rozwiązania są niewłaściwe.

Obecne rozwiązanie polega na zastosowaniu sprzęgła odśrodkowego, pośredniczącego pomiędzy silnikiem elektrycznym a wirówką (rys. 2.15). Otrzymaliśmy w ten sposób napęd podwójny:

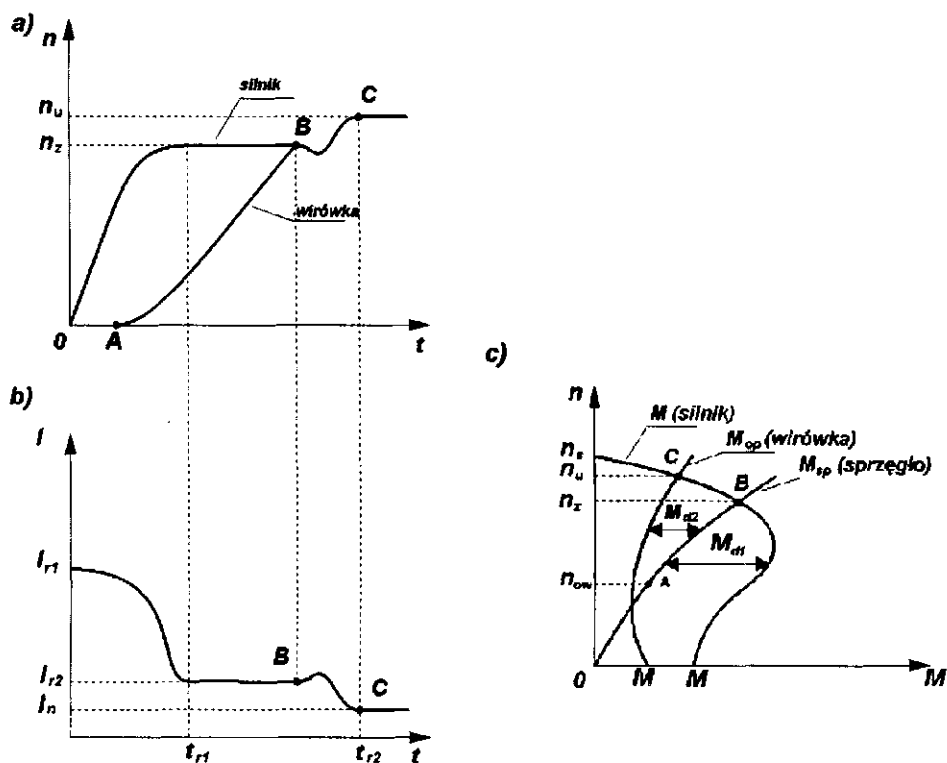
- 1) silnik elektryczny napędza sprzęgło,
- 2) sprzęgło napędza wirówkę.



Rys. 12.15. Schemat kinematyczny napędu wirówki:  $M$  - moment napędowy silnika,  $M_{sp}$  - moment sprzęgła

Silnik elektryczny napędza sprzęgło przy momencie dynamicznym  $Md_1$  (rys. 12.16 c) aż do punktu *B*. W tym czasie sprzęgło będzie napędzało wirówkę przy momencie dynamicznym  $Mj_2$ , lecz ruch wirówki rozpocznie się wtedy, gdy

moment sprzęgła przekroczy statyczny moment wirówki  $M_{ost}$ . Stan przejściowy (rozruch) od punktu  $A$  do  $B$  odbywa się przy lekkim przeciążeniu silnika  $T_{r2}$  (rys. 12.16 b). W punkcie  $B$  obroty sprzęgła i silnika zrównają się, co spowoduje za-sprężenie sprzęgła. Nastąpi krótkotrwałe obniżenie obrotów, wzrost prądu i wzrost obrotów z punktu  $B$  do  $C$ . W tym punkcie wirówka pracuje na obrotach ustalonych, a silnik pobiera prąd znamionowy.



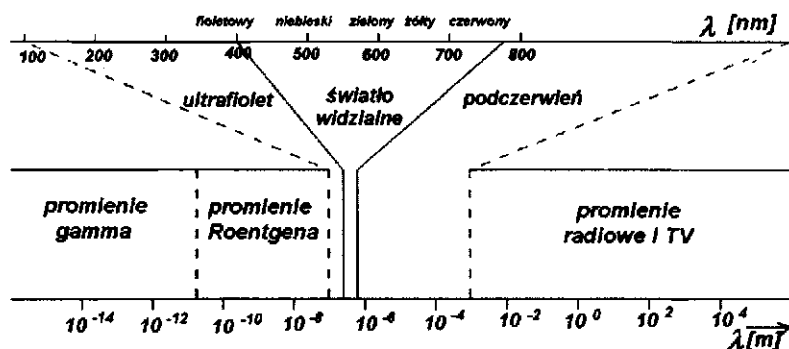
Rys. 12.16. Napęd wirówki silnikiem asynchronicznym klatkowym:

- zmiana obrotów wirówki i silnika w stanie rozruchowym,
- natężenie prądu silnika w stanie rozruchowym wirówki,
- zależność momentów i obrotów silnika, sprzęgła oraz wirówki:  $n_{ow}$  - prędkość uruchamiania wirówki,  $n_z$  - prędkość zaszprzężenia sprzęgła,  $n_u$  - prędkość ustalona

## 13. Oświetlenie

### 13.1. Podstawowe wielkości techniki świetlnej

Światłem nazywamy promieniowanie elektromagnetyczne, rozchodzące się falami, kuliście ze swego źródła w zakresie wąskiego pasma o długości fali od 380 do 780 nm. Pozostałe długości fal nie są odbierane przez oko ludzkie. Zakres światła na tle różnych częstotliwości elektromagnetycznych przedstawia rys. 13.1.



Rys. 13.1. Zakres promieniowania elektromagnetycznego

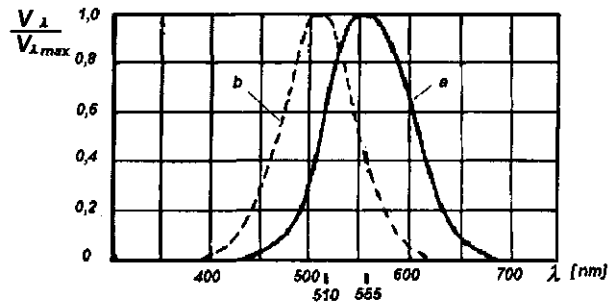
Długość fali ściśle określa barwę światła. Wrażliwość przeciętnego oka ludzkiego jest różna na poszczególne częstotliwości (barwy). Tę wrażliwość można nazwać względną skutecznością świetlną i jest pokazana na rys. 13.2.

Źródła światła pobierają określoną moc elektryczną i część jej zmieniają na strumień świetlny. Możemy zatem stwierdzić, że strumień świetlny jest to moc promieniowania w zakresie fal widzialnych, oceniana według wrażenia wzrokowego. Strumień świetlny jest oznaczany jako  $\Phi_v$  mierzony w **lumenach (lm)**.

**Światłość** w danym kierunku ( $I$ ) jest to strumień świetlny  $d\Phi_v$  wysłany przez źródło światła w danym kierunku, zawarty w kącie przestrzennym  $d\Omega$ . Innymi słowy, jest to wartość strumienia świetlnego zawartego w jednostce kąta przestrzennego mierzonego w steradianach - sr):



$$I = \frac{\Phi}{\omega} \quad (13.1)$$



**Rys. 13.2.** Względna skuteczność świetlna dla oka ludzkiego:  
a) w dzień (maksimum dla barwy zielonożółtej); b) w  
nocy (maksimum dla barwy niebieskozielonej)

Jednostką światłości jest **kandela** (cd) - jedna z jednostek podstawowych układu SI (oparta na wzorcu zdefiniowanym na promieniowaniu ciała doskonale czarnego). Tak więc strumień o wielkości  $I_{lm}$  odpowiada światłości 1 cd zawartej w kącie 1 sr lub inaczej:

$$1 \text{ cd} = \frac{1 \text{ lm}}{1 \text{ sr}}$$

**Skuteczność świetlna**  $\eta_p$  źródła światła jest to stosunek mocy strumienia świetlnego  $\langle P_{do}$  mocy czynnej  $P$  pobranej ze źródła energii elektrycznej:

$$\eta_p = \frac{\Phi}{P} \left[ \frac{\text{lm}}{\text{W}} \right] \quad (13.2)$$

Wartość ta świadczy o jakości źródła światła jako przemiennika energii elektrycznej na świetlną.

**Natężenie oświetlenia**  $E$  jest powierzchniową gęstością strumienia świetlnego padającego na daną powierzchnię. Inaczej możemy określić natężenie oświetlenia jako wielkość strumienia świetlnego ( $P$  padającego prostopadle na jednostkę powierzchni  $S$ ):

$$E = \frac{\Phi}{S} \quad (13.3)$$

Jednostką natężenia oświetlenia jest luks (lx)

$$1 \text{ lx} = \frac{1 \text{ lm}}{1 \text{ m}^2}$$

Można wykazać na podstawie powyżej podanych zależności, że natężenie oświetlenia wyraża się również wzorem:

$$E = \frac{I_{\alpha}}{r^2} \text{ [lx]}$$

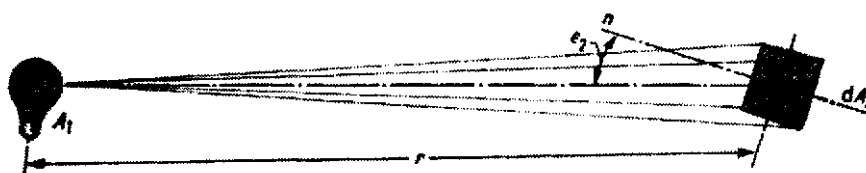
gdzie:

$I_{\alpha}$  - światłość źródła światła w danym kierunku,

$r$  - odległość oświetlanej powierzchni od źródła światła.

Jeżeli płaszczyzna oświetlana jest ustawiona pod pewnym kątem  $\epsilon$  w stosunku do normalnej płaszczyzny jak na rys. 13.3, to otrzymamy:

$$E = \frac{\Phi}{s} \cos \epsilon = \frac{I_{\alpha}}{r^2} \cdot \cos \epsilon \text{ [lx]} \quad (13.5)$$



Rys. 13.3. Natężenie oświetlenia na powierzchni położonej ukośnie względem osi strumienia świetlnego

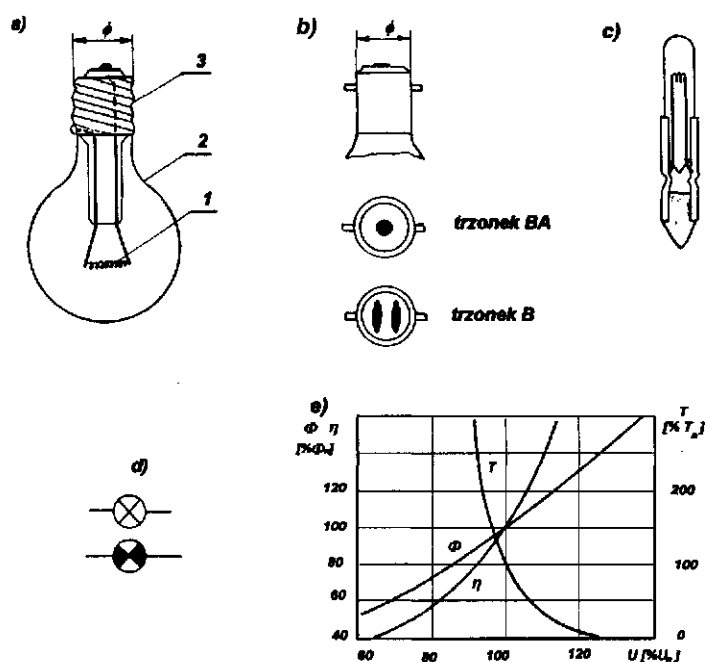
## 13.2. Elektryczne źródła światła

### 13.2.1. Żarówki

Żarówki (lampy żarowe) są znane od 1879 r., kiedy Edison skonstruował pierwszą żarówkę z włóknem węglowym. Rok później, tj. w 1880 r. zastosowano oświetlenie żarówkami elektrycznymi w warsztatach i na statkach. Żarówki do dnia dzisiejszego są powszechnie stosowanym źródłem światła. Współczesne **żarówki** (rys. 13.4) z **włóknem wolframowym** zwanym **żarnikiem**, najczęściej spotyka się na napięciu 220 V i 110 V oraz o mocy **15 do 1000 W**, a do celów specjalnych nawet do kilku kilowatów.

W przemysłowych obiektach i budownictwie mieszkalnym stosuje się żarówki z trzonkiem z **gwintem Edisona** o średnicy:

- do 3 W z trzonkiem E10 do lampek sygnalizacyjnych i latarek ręcznych,
- do 60 W z trzonkiem **E14** do żyrandoli i lamp dekoracyjnych,
- do 200 W z trzonkiem E27 do zwykłych opraw oświetleniowych,
- powyżej 200 W z trzonkiem E40 do przemysłowych opraw oświetleniowych.



Rys. 13.4. Żarówki:

- żarówka z trzonkiem gwintowanym E (1 - żarnik, 2 - bańka, 3 - trzonek);
- trzonki bagnetowe B i BA;
- żarówka teletechniczna z trzonkiem T;
- symbole graficzne żarówek;
- zależność parametrów żarówki od napięcia roboczego ( $\langle P$  - strumień świetlny,  $T$ ] - skuteczność świetlna,  $T$ - trwałość)

W miejscach gdzie występują intensywne drgania, mogą być stosowane żarówki z trzonkiem bagnetowym, najczęściej o wymiarach B15 i B22 (rys. 13.4 b). Żarówki tego typu są używane na statkach i w pojazdach mechanicznych. W niektórych lampkach sygnalizacyjnych stosuje się żarówki teletechniczne z trzonkiem typu T (rys. 13.4 d).

Strumień świetlny żarówek ma widmo ciągłe. Jego barwa odpowiada temperaturze barwowej  $T_v = 2800 \text{ K}$  i różni się od światła dziennego. W pomieszczeniach oświetlonych żarówkami rozróżnialność barw jest słaba. Podwyższenie temperatury żarnika poprawia wydajnie jakość barwy światła, ale zwiększa to odparowanie wolframu z włókna żarówki, co powoduje zaczernienie bańki oraz krótszą żywotność żarówki.

**Trwałość żarówek** w normalnych warunkach eksploatacyjnych wynosi około 1000 godzin.

**Zmiana parametrów** technicznych żarówek zależy w dużym stopniu od wartości napięcia roboczego  $U$  (rys. 13.4 e).

Zależność strumienia świetlnego od napięcia roboczego  $U$  (w stosunku do napięcia znamionowego żarówki  $U_n$ ) jest równa:

$$\Phi = \Phi_n \left( \frac{U}{U_n} \right)^{3,8} \quad (13.6)$$

a zależność trwałości  $T$  od napięcia  $U$  wynosi:

$$T = T_n \left( \frac{U}{U_n} \right)^{-1,4}$$

natomiast zależność sprawności żarówki:

$$\eta = \eta_n \left( \frac{U}{U_n} \right)^{1,84}$$

Skuteczność świetlna  $77\%$ , w normalnych warunkach eksploatacyjnych żarówek o napięciu znamionowym  $220 \dots 230 \text{ V}$  w nieznacznym stopniu zależy od mocy i można przyjąć, że wynosi średnio  $15 \text{ lm/W}$ .

**Lampy żarowe halogenowe** charakteryzują się tym, że w bańce oprócz gazu neutralnego, którym zazwyczaj jest argon, jest stosowana mieszanina gazu z grupy chlorowców (**jod, brom, fluor**) zwanej **halogenami**. Dzięki tym pierwiastkom zachodzi tzw. **halogenowy cykl regeneracyjny** polegający na tym, że wyparowane z żarnika cząstki wolframu wiążą się z jodem tworząc lotną cząstkę, która po zetknięciu się z żarnikiem o wysokiej temperaturze ( $t = 3000^\circ\text{C}$ ) rozpada się na wolfram osiadający na żarniku i jod powracający do gazu w bańce. Umożliwia to podniesienie temperatury żarnika, stąd rozkład widmowego promieniowania tych lamp jest bardziej zbliżony do światła dziennego niż światło żarówek konwencjonalnych. Wysoka temperatura wymaga zastosowania szkła odpornego na ciepło, dlatego też zamiast szkła zwykłego, do wyrobu ba-

niek stosuje się **szkło kwarcowe**. Ponadto często chłodzi się żarówki wymuszonym strumieniem powietrza. Trwałość żarówek halogenowych jest większa niż konwencjonalnych.

**Parametry techniczne** lamp halogenowych:

trwałość	-	$T = 6000 \text{ h}$ ,
skuteczność świetlna	-	$\eta_p = 22 \text{ lm/W}$ ,
temperatura żarnika	-	$t_z = 3000 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
temperatura bańki	-	$t_b > 250 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Wymagania eksploatacyjne** lamp halogenowych:

- nie mogą pracować przy obniżonym napięciu (niższej temperaturze), gdyż halogenowy cykl regeneracyjny nie działa poniżej  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- powinny być usytuowane ściśle według zaleceń wytwórcy (najczęściej w pozycji poziomej);
- lampa musi być utrzymana w idealnej czystości; w przypadku zabrudzenia, lub dotknięcia gołymi rękami, należy przemyć spirytusem;
- obudowa lampy powinna być szczelna przed przedostaniem się pyłu i kurzu.

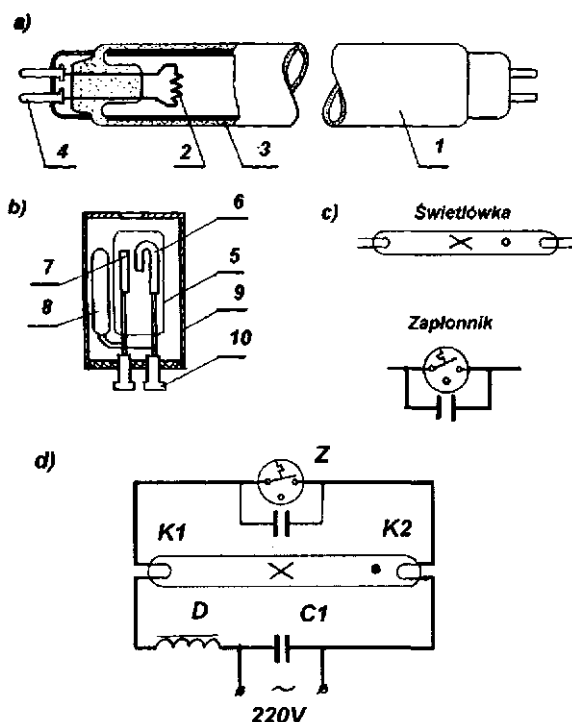
### 13.2.2. Lampy fluorescencyjne (świetlówki)

Świetlówki należą do kategorii lamp luminescencyjnych. Zbudowane są w kształcie rury o długości 0,5 -s- 1,2 m z przezroczystego szkła. Na obu końcach umieszczone są elektrody, nagrzewane przy zapłonie do temperatury  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ . Wnętrze rury powleczone jest cienką warstwą **luminoforów**, składników chemicznych o właściwościach luminescencyjnych (świecących pod wpływem promieniowania). Przez odpowiedni dobór luminoforów można otrzymać różne barwy światła. Rura wypełniona jest gazem - argonem o ciśnieniu ok. 1 Pa oraz parami rtęci. Przepływ prądu w gazie emituje obok promieniowania widzialnego promieniowanie nadfioletowe (UV) o długości 254 nm (poza zakresem fal widzialnych). Luminofor ma zdolności do przetwarzania niewidzialnego promieniowania na widzialne. Jest on więc jakby transformatorem długości fal. Przez dobór luminoforu uzyskuje się żądaną barwę światła. Budowę świetlówki pokazano na rys. 13.5.

Praca lampy fluorescencyjnej odbywa się w specjalnych układach umożliwiających zapłon i pracę ustaloną. Przy zapłonie lampa wymaga wyższego napięcia  $800 \text{ V}^* - 1000 \text{ V}$ , a w pracy ustalonej  $105 \text{ V} - 115 \text{ V}$ .

**Dławik D** jest statecznikiem (stabilizatorem) ograniczającym wzrost prądu powyżej dopuszczalnego po zapłonie, gdy wymagane napięcie na lampie jest jedynie ok.  $110 \text{ V}$ . Statecznikiem może być również rezystor o oporności  $R$ , lub

pojemności  $C$  o reaktancji  $X_C$ . W układach okrętowych w Polsce jako stabilizatory stosuje się dławiki.



Rys. 13.5. Budowa lampy fluorescencyjnej:

- a) budowa świetlówki  
(1 - rura szklana, 2 - elektroda, 3 - warstwa luminoforu, 4 - kołek stykowy);
- b) zapłonnik  
(5 - bańka szklana, 6 - pasek bimetalowy, 7 - styk stały, 8 - kondensator przeciwzakłóceńowy, 9 - obudowa, 10 - kołek stykowy);
- c) symbole graficzne;
- d) układ pracy (D - dławik, Z - zapłonnik,  $K_1$ ,  $K_2$  - elektrody)

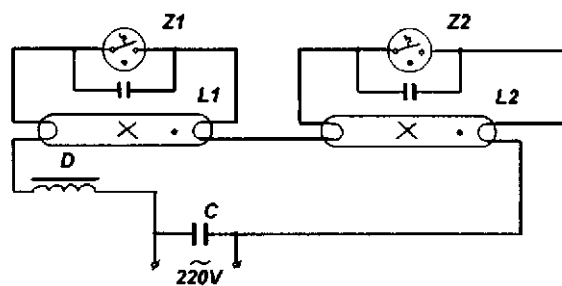
**Zapłonnik (starter) Z** służy do zaświecenia rury przy podgrzanej elektrodzie. Zapłonnikiem może być lampka tła (neonowa) o jednej elektrodzie stałej a drugiej bimetalowej (która wygina się pod wpływem ciepła i zwiera się ze stałą). W chwili włączenia napięcia, elektrody zapłonnika są otwarte. Ponieważ napięcie do zainicjowania wyładowania w rurze jest za niskie, rozpoczyna się wyładowanie w zapłonniku, gdyż jemu wystarcza napięcie ok. 180 V. Wyładowanie to rozgrzewa blaszkę bimetalową i powoduje zwarcie się styków zapłonnika. Zwiększa się prąd w obwodzie, podgrzewa żarniki w rurze lampy, powo-

dując powstanie par rtęci. Stygnący bimetal zapłonika otwiera swoje styki, przerywając prąd w obwodzie. Na dławiku o indukcyjności  $L$  wystąpi znaczna siła elektromotoryczna samoindukcji, a wywołana przez to fala napięciowa o wartości ok. 1000 V spowoduje zainicjowanie przepływu prądu w rurze. Spadek napięcia na rurze, wynoszący w czasie świecenia ok. 110 V, jest zbyt mały dla ponownego zapłonu zapłonika.

**Kondensator C** włączony na zasilaniu służy do kompensacji prądu biernego indukcyjnego, pobieranego przez dławik  $D$ . Kondensator  $C$  w zapłonniku służy do tłumienia zakłóceń radiowych i zmniejsza iskrzenie na elektrodach zapłonika.

*Poszczególne elementy układu muszą być wzajemnie dopasowane i są cechowane wartością mocy lampy. Gdy lampa posiada moc 40 W, to dla dławika  $D$  i zapłonika  $St$  muszą być również oznaczone 40 W.*

W przemyśle okrętowym i żegludze stosuje się lampy o mocy 20 W, wówczas łączy się je w szereg po dwie według układu jak na rys. 13.6.



Rys. 13.6. Układ dwu świetlówek 20 W w pracy szeregowej

#### Lampy fluorescencyjne mają następujące zalety:

- dogodna barwa światła (zależna od rodzaju luminoforu), dobra rozróżnialność barw,
- duża skuteczność świetlna od 50 do 80 lm/W
- duża trwałość, przy małej częstotliwości łączeń ok. 6000 h,
- mała zmienność strumienia świetlnego przy wahaniach napięcia.

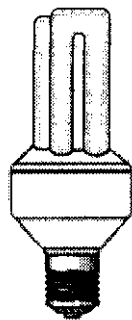
#### Do wad lamp fluorescencyjnych zalicza się:

- wysoka cena oprawy (wraz z wyposażeniem);
- wrażliwość na niskie temperatury. Optymalna temperatura otoczenia wynosi 25°C. Przy temperaturze 0°C strumień świetlny zmniejsza się

- do ok. 50%, występuje trudność w zapłonie, a nawet może on nie nastąpić;
- strumień świetlny pulsuje z częstotliwością  $\omega^2$ , czyli przy częstotliwości 50 Hz  $\omega = 100$  c/s, co jest męczące dla wzroku, a przy wirujących maszynach ze względu na złudzenie optyczne może być niebezpieczne. Zjawisko to zwane stroboskopowością można (a w warsztatach należy) eliminować przez:
    - stosowanie oświetlenia mieszanego — żarówki i świetłówki,
    - zasilanie lamp z różnych faz sieci zasilającej,
    - stosowanie pojemnościowego przesuwnika fazowego.

Zwiększenie częstotliwości napięcia zasilającego, zwiększa częstotliwość strumienia świetlnego, zmniejsza zjawisko stroboskopowości, zwiększa strumień świetlny oraz polepsza zapłon tak, że nawet w niektórych układach nie stosuje się zapłonika. Zwiększenie częstotliwości napięcia zasilającego wymaga jednak zastosowania przetwornicy częstotliwości, a to zwiększa koszt układu.

Obecnie coraz częściej stosuje się świetłówki typu **kompakt**, nie posiadające tradycyjnego zapłonika i statecznika (rys. 13.7). Zastępuje je układ elektroniczny, który między innymi zwiększa częstotliwość napięcia roboczego. Układ elektroniczny stanowi zazwyczaj całość ze świetłówką, która jest wyposażona w gwint E27, co pozwala na montowanie lampy w zwykłej oprawie oświetleniowej. Świetłówki kompaktowe odznaczają się dużą trwałością, niskim poborem energii elektrycznej i naturalną barwą światła.



Rys. 13.7. Świetłówka kompaktowa

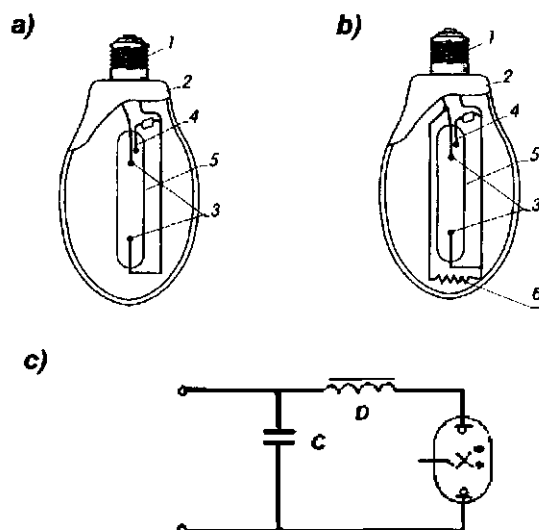


### 13.2.3. Lampy rtęciowe

W lampie rtęciowej źródłem światła jest rurka ze szkła kwarcowego nazywana **jarznikiem**, wypełniona argonem i odrobiną rtęci. W jarzniku podczas pracy lampy panuje wysokie ciśnienie (kilka MPa). Do wstępnego podgrzania lampy i wyparowania rtęci zastosowano elektrodę pomocniczą, umieszczoną w pobliżu elektrody głównej (rys. 13.8).

Zwiększenie ciśnienia w jarzniku spowodowało przesunięcia widma promieniowania w kierunku fal widzialnych, jednak barwa światła jest niebieskozielona i odbiega znacznie od światła dziennego.

Barwę rtęciowej lampy można poprawić przez zastosowanie dodatkowego żarnika wolframowego. Taką lampę nazywamy **rtęciowo-żarowa** (rys. 13.8 b). Drugim sposobem zmiany barwy światła jest zastosowanie luminoforu w bańce zewnętrznej, podobnie jak w świetlówkach. Lampa rtęciowa jako wyładowcze źródło światła wymaga ograniczenia natężenia prądu w czasie pracy. Dlatego też, lampy te pracują ze statecznikiem indukcyjnym (dławikiem), podobnie jak świetlówki. Należy również stosować kondensator w celu zmniejszenia prądu biernego indukcyjnego (kompensacja mocy biernej). Lampa rtęciowo-żarowa nie wymaga zewnętrznego statecznika, gdyż jego rolę spełnia żarnik wolframowy połączony szeregowo z jarznikiem; okupione to jednak zostało niższą trwałością ze względu na żarnik.



Rys. 13.8. Rtęciówki:

- a) lampa rtęciowa zwykła; b) lampa rtęciowo-żarowa; c) układ zasilania lampy rtęciowej;  
1 - trzonek, 2 - bańka szklana zewnętrzna, 3 - elektrody główne, 4 - elektroda zapłonowa,  
5 - jarznik, 6 - żarnik wolframowy, *D* - dławik, *C* - kondensator

Odmianą lampy rtęciowej jest **lampa metalohalogenowa**, pod względem budowy podobna do wysokociśnieniowej lampy rtęciowej. Główną różnicą pomiędzy nimi jest to, że rura wyładowcza lampy metalohalogenowej jako dodatek do rtęci zawiera odpowiednią ilość metalohalogenów. Halogenki są częściowo odparowywane, kiedy lampa dochodzi do znamionowej temperatury pracy. Pary halogenowe są rozdzielane pod wpływem ciepła z łuku na halogen i metal. Metal odparowuje, dając promieniowanie w odpowiednim zakresie długości fal.

**Zalety lamp rtęciowych:**

- duża skuteczność świetlna 40 ••• 50 m/W, a w niektórych typach lamp nawet do 90 lm/W,
- duża trwałość do 6000 godzin,
- mała wrażliwość na temperaturę otoczenia.

**Wady lamp rtęciowych:**

- znaczny koszt inwestycyjny;
- długi czas zapłonu (ok. 4 minut) od włączenia napięcia do świecenia pełnym strumieniem;
- po wyłączeniu lampy, jej ponowne zaświecenie jest możliwe po częściowym ostygnięciu, co trwa kilka minut;
- występuje zjawisko stroboskopowości;
- większość lamp rtęciowych ma ściśle określoną pozycję pracy. Zmiana pozycji pracy może wywoływać nie tylko poważną zmianę kolorów, ale również może mieć wpływ na trwałość lampy oraz możliwość zapłonu.

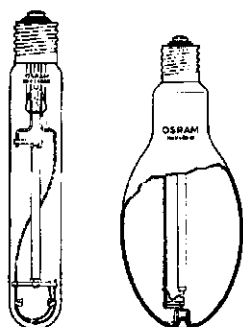
### 13.2.4. Lampy sodowe

Źródłem światła jest jarznik zawierający metaliczny sód oraz gaz neon. Współczesne lampy sodowe budowane są w dwóch podstawowych rodzajach - niskoprężne i wysokoprężne.

**Lampy sodowe niskoprężne** emitują monochromatyczne żółto-pomarańczowe światło o długości fali ok. 590 nm. Jarznik umieszczony jest w bańce szklanej z próżnią, stanowiącą dobrą izolację cieplną. W monochromatycznym świetle lampy sodowej niskoprężnej wzrasta kontrastowość przedmiotów i ostrość widzenia we mgle i kurzu. Jednak w ich oświetleniu brak jest możliwości rozróżniania barw przedmiotów - wszystkie obiekty wydają się mieć barwę żółto-pomarańczową, brunatną lub szarą. Lampy sodowe są bardzo przydatne do oświetlenia autostrad i wielkich ulic wylotowych miasta o dużym natężeniu ruchu ze względu na ostrość widzenia przedmiotów i dużą skuteczność świetlną dochodzącą do 200 lm/W. Lampy tego rodzaju wymagają specjalnego stabilizatora prądu i układu zapłonowego wysokiego napięcia rzędu 3k V. Te lampy nie są jednak stosowane na statkach.

**Lampy sodowe wysokoprężne** emitują światło żółto-pomarańczowe, lecz z domieszką ultrafioletu i podczerwieni, a więc umożliwiające choć niezbyt wiernie rozróżnianie barw przedmiotów. Podstawowe cechy tych lamp to:

- wysoka skuteczność świetlna, ok. 100 lm/W;
- wysoka trwałość dochodząca do 24 000 godzin;
- wysoki koszt inwestycyjny;
- czas zapłonu od włączenia napięcia do osiągnięcia pełnego strumienia 6-10 min, uniemożliwia to natychmiastowy zapłon po chwilowym zaniku napięcia;
- konieczność pracy ze stabilizatorem prądu i najczęściej z układem zapłonowym wysokonapięciowym.



Rys. 13.9. Lampy sodowe prod. Osram typu NaV

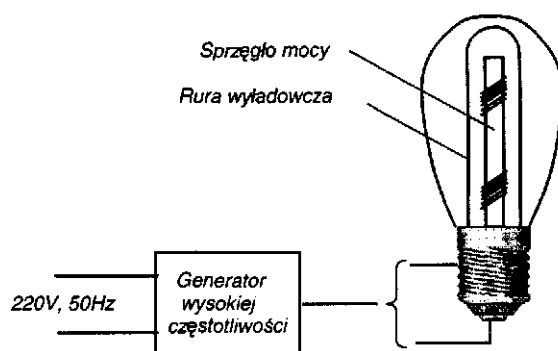
Lampy sodowe charakteryzują się dużą skutecznością świetlną, a więc również oszczędnością energii elektrycznej. Lampy tego rodzaju są szeroko stosowane do oświetlenia dróg publicznych, autostrad, terminali kontenerowych, portów, hal produkcyjnych, obiektów sportowych a ostatnio też pokładów otwartych statków morskich.

### 13.2.5. Lampy ksenonowe i indukcyjne

**Lampa ksenonowa** należy do lamp wyładowczych. Rurka o wypukłej bańce ze szkła kwarcowego jest wypełniona gazem szlachetnym - ksenonem (Xe) i posiada dwie wtopione elektrody wolframowe. Do pracy niezbędny jest statecznik (dławik) i zapłonnik, gdyż napięcie zapłonu jest znacznie wyższe od napięcia roboczego. Największą zaletą lampy ksenonowej jest barwa bardzo zbliżona do światła naturalnego dziennego. Trwałość lamp ksenonowych jest zbliżona do trwałości lamp rtęciowych - 6000 h. Skuteczność świetlna wynosi  $T_l = 25 \text{ lm/W}$ .

**Lampa indukcyjna typu QL** (rys. 13.10) jest jednym z najnowszych źródeł światła. Systemy indukcyjne QL składają się z bezstykowej niskoprężnej lampy wyładowczej, generatora mocy wysokiej częstotliwości HF i tzw. „sprzęgła mocy”. Koncepcja działania lampy indukcyjnej oparta jest na połączeniu dwóch dobrze znanych zasad: indukcji elektromagnetycznej i wyładowania w gazie.

Napięcie zasilania 220 V jest przekształcane przez elektroniczny generator wysokiej częstotliwości w prąd przemienny o częstotliwości 2,65 MHz. Prąd ten przepływa przez uzwojenie pierwotne, nawinięte wokół pręta ferrytowego wchodzącego w skład sprzęgła mocy. Przepływ prądu indukuje pole elektromagnetyczne, które powoduje wtórny przepływ elektronów w gazie otaczającym uzwojenie pierwotne. Elektrony rozbijają atomy rtęci, jonizują molekuły gazu oraz wywołują emisję energii w postaci promieniowania ultrafioletowego. Promieniowanie UV przechodząc przez luminofor, którym jest pokryta wewnętrzna ściana bańki wyładowczej, jest przekształcane w światło widzialne o bardzo dobrej charakterystyce oddawania barw. Trwałość tych lamp jest bardzo duża od 50 do 100 tysięcy godzin. Są one jeszcze bardzo drogie, lecz ze względu na dużą żywotność mogą konkurować z lampami sodowymi.



Rys. 13.10. Lampa indukcyjna typu QL prod. Philips

### 13.3. Oprawy oświetleniowe

Oprawy oświetleniowe służą do zamocowania źródeł światła i połączenia ich z siecią zasilającą, ochrony tych źródeł przed narażeniami środowiskowymi i właściwego ukierunkowania strumienia świetlnego.

Podstawowym elementem oprawy są jej **korpus** oraz **oprawka** (służąca do zamocowania źródła światła). Oprawa, w zależności od przeznaczenia, może być dodatkowo wyposażona w:

- **odbłyśnik**, kierujący strumień światła w żądanym kierunku;
- **klosz**, stanowiący przezroczystą ochronę źródła światła;
- **siatkę**, chroniącą klosz przed uszkodzeniami mechanicznymi.

Korpusy opraw do lamp rtęciowych i świetlówek zawierają zwykle dodatkowe wyposażenie elektryczne lub elektroniczne (dławiki, zapłonniki, kondensatory, przetwornice itd.).

Ze względu na przeznaczenie, oprawy klasyfikuje się na rodzaje:

- **wnętrzowe ogólnego przeznaczenia**, do oświetlenia pomieszczeń mieszkalnych i ogólnego użytku; zwykle wyposażone w odbłyśniki, klosze i ozdobne korpusy; oprawy przystosowane do montażu w sufitach nazywane są **plafonierami**;
- **przemysłowe**, do oświetlenia pomieszczeń o charakterze przemysłowym; oprawy przemysłowe można podzielić na zwykłe, pyłoszczelne, wodoszczelne oraz przeciwwybuchowe;
- **zewnątrzne**, do oświetlenia terenów otwartych, ulic itp.

Do oświetlenia pokładu statku oraz jego pomieszczeń ruchu i magazynowych używa się opraw charakteryzujących się, oprócz spełnienia wymogów strugo- i pyłoszczelności, odpornością na narażenia typowe dla środowiska morskiego.

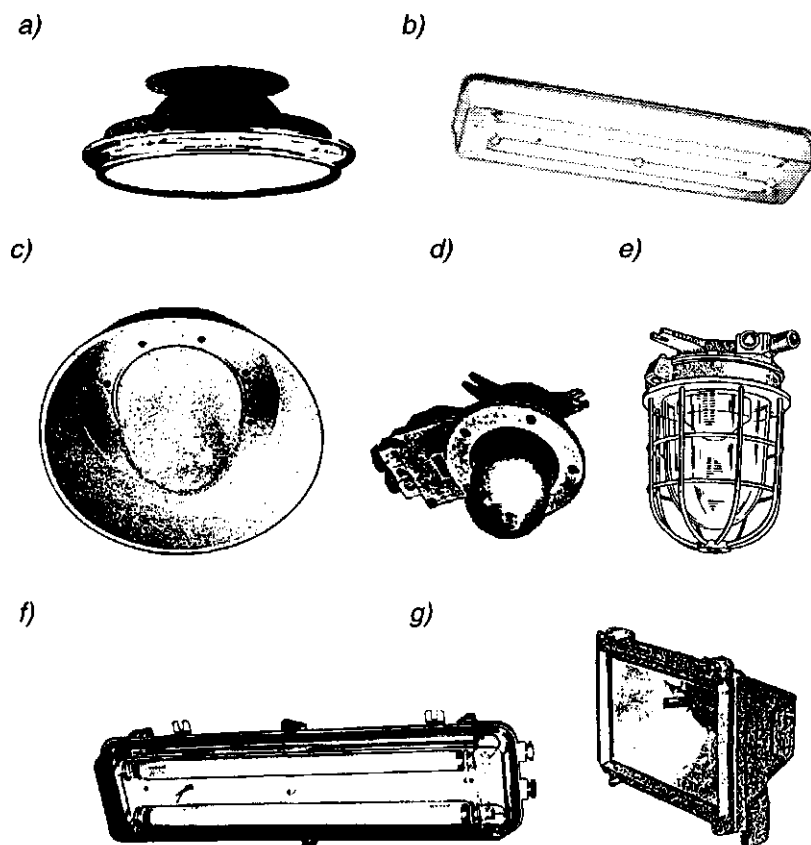
Specyficznymi rodzajami opraw oświetleniowych są projektory, wysyłające skupioną wiązkę promieni o małym kącie przestrzennym (kąt rozsyłu światła nie przekracza 10°). Używane są na statkach do oświetlania odległych obiektów. Projektory służące do oświetlenia pokładów noszą nazwę **naświetlaczy**. Mają one nieco większy kąt rozsyłu światła (do 30°).

## 13.4. Oświetlenie pomieszczeń i pokładów otwartych

Natężenie oświetlenia pomieszczeń powinno być zależne od przeznaczenia, rodzaju czynności wykonywanej w danym miejscu oraz rodzaju źródła światła. Można przyjąć, że przy oświetleniu luminescencyjnym należy przewidzieć o 50% większe natężenie niż przy oświetleniu żarowym.

Dla zobrazowania wielkości natężenia poniżej podano kilka wartości wymaganego przez PRS natężenia oświetlenia przy oświetleniu żarowym:

1) na stole kabiny radowej	200 lx
2) na stole kabiny nawigacyjnej	150 lx
3) powierzchnie rozdzielnic i stanowisko sterowania SG	150 lx
4) akumulatornia	50 lx
5) przejścia na pokładach	20 lx
6) przestrzeń zaburtowa w miejscu opuszczania łodzi ratunkowej	5 lx



Rys. 13.11. Okrętowe oprawy oświetleniowe:

- a) plafoniera z żarówkami; b) plafoniera ze świetlówkami; c) oprawa przemysłowa z lampą rtęciową; d) oprawa przemysłowa z żarówką; e) oprawa przeciwwybuchowa; f) oprawa przemysłowa ze świetlówkami; g) naświetlacz masztowy z żarówką halogenową

Przyjmuje się, że **oświetlenie pomieszczeń** mieszkalnych, służbowych ogólnego użytku i przejść wykonuje się z **dwóch niezależnych obwodów**, tak aby przy uszkodzeniu jednego obwodu punkty świetlne zasilane z drugiego obwodu dawały możliwie równomierne oświetlenie. W kabinie mieszkalnej oświetlenie ogólne (sufitowe) zasilane jest z innego obwodu niż oświetlenie miejscowe (lampa stojkowa, lampa nad lustrem, gniazdo wtykowe przy stole). W maszynowni tych obwodów jest więcej ze względu na ilość lamp.

Na jednym obwodzie **według wymagań PRS może być zainstalowane nie więcej niż 24 lampy** przy napięciu 121 -s- 250 V.

Przy oświetleniu pomieszczeń i miejsc, w których znajdują się widoczne części wirujące, np, warsztaty, należy zastosować oświetlenie nie powodują-

**ce zjawiska stroboskopowego.** Może to być oświetlenie żarowe, mieszane luminescencyjno-żarowe, luminescencyjne z oprawami antystroboskopowymi, luminescencyjne zasilane z różnych faz itp. Oświetlenie miejscowe przy urządzeniach wirujących powinno być wykonane lampami żarowymi.

**Lampy przenośne** powinny być zasilane napięciem bezpiecznym (12 lub 24 V) z transformatorów bezpieczeństwa. W tym celu na statkach rozmieszczone są specjalne gniazda wtykowe. Szczególnie takie gniazda powinny być umieszczone:

- 1) w maszynowni,
- 2) za rozdzielnicą główną,
- 3) w tunelu wału śrubowego,
- 4) w pomieszczeniu zespołu awaryjnego,
- 5) w pomieszczeniu maszyny sterowej,
- 6) w centrali klimatyzacyjnej,
- 7) w pomieszczeniach zamkniętych ruchu elektrycznego,
- 8) na pokładzie otwartym przy wciągarni kotwicznej i wciągarkach ładunkowych,
- 9) w sterowni, kabinie radiowej, pomieszczeniu przetwornic itp.

**Oświetlenie pokładów otwartych (oświetlenie zewnętrzne)** zasilane jest z osobnych rozdzielnic dla części pokładów nadbudówki i osobnej rozdzielnicy dla oświetlenia statku przed nadbudówką. O ile oświetlenie wewnętrzne statku jest włączane indywidualnie dla każdego pomieszczenia (łączniki są umieszczone przy drzwiach), to oświetlenie zewnętrzne statku jest włączane centralnie -ze sterowni. Oświetlenie pokładu ładunkowego wykonuje się lampami halogenowymi, rtęciowymi i sodowymi (na starszych statkach można jeszcze spotkać naświetlacze z żarówkami), umieszczonymi w obudowach typu reflektorowego o strumieniu skupionym o określonej charakterystyce światłości  $I_a$ .

Do celów specjalnych stosuje się reflektory typowe tylko dla tych zadań. Na przykład reflektor poszukiwacz o wąskim strumieniu świetlnym i dużej mocy (zasięg do 30 mil morskich) umieszcza się na pokładzie namiarowym lub nawigacyjnym. Reflektory poszukiwacze bardzo często wyposażane są w rolety umożliwiające przerywanie strumienia świetlnego do sygnalizacji alfabetem Morse'a (wyłączanie lampy do tego celu jest niemożliwe ze względu na dużą bezwładność źródła światła). Reflektor Kanału Sueskiego o podwójnym strumieniu świetlnym umieszcza się na dziobie. Reflektory te zasilane są z rozdzielnicy głównej osobnymi obwodami.

## 13.5. Oświetlenie awaryjne

Zgodnie z Konwencją o bezpieczeństwie życia na morzu (SOLAS 74) oraz przepisami PRS statki powinny posiadać oświetlenie awaryjne zasilane z rozdzielnic awaryjnej (RA) w przypadku zaniku napięcia na rozdzielnic głównej (RG).

**Natężenie oświetlenia** awaryjnego powinno wynosić:

- 1) maszynownia - 5% natężenia oświetlenia ogólnego;
- 2) drogi ewakuacyjne co najmniej 0,2 lx;
- 3) pomieszczenia wymienione poniżej - 10% natężenia oświetlenia ogólnego:
  - wszystkie korytarze, schody i wyjścia z pomieszczeń mieszkalnych i służbowych oraz kabiny dźwigów osobowych i ich szybów;
  - pomieszczenia maszynowe i zespołów prądotwórczych;
  - wszystkie stanowiska sterowania oraz rozdzielnica główna i awaryjna;
  - pomieszczenia awaryjnego zespołu prądotwórczego,
  - sterownia;
  - kabina nawigacyjna i pomieszczenia radiostacji;
  - miejsca składowania sprzętu awaryjnego, sprzętu pożarniczego i usytuowania ręcznych przycisków sygnalizacji pożarowej;
  - pomieszczenia urządzenia sterowego;
  - miejsca przy pompie pożarniczej, awaryjnej pompie zęzowej i pompie instalacji tryskaczowej oraz miejsca rozruchu ich silników;
  - hangary i lądowiska dla śmigłowców;
  - pomieszczenia żyrokompasu;
  - pomieszczenia szpitalne.

Każda oprawa lampy oświetlenia awaryjnego powinna być **oznaczona kolorem czerwonym**. W obwodach oświetlenia awaryjnego nie stosuje się łączników, umożliwiających odłączenie lamp. Podyktowane jest to tym, żeby obwody te były ciągle załączone lub gotowe do zaświecenia w przypadku uruchomienia awaryjnego źródła energii. Od tej zasady są odstępstwa, np. stosuje się łączniki w oświetleniu awaryjnym sterowni i lampach pełniących funkcje oświetlenia podstawowego i awaryjnego.

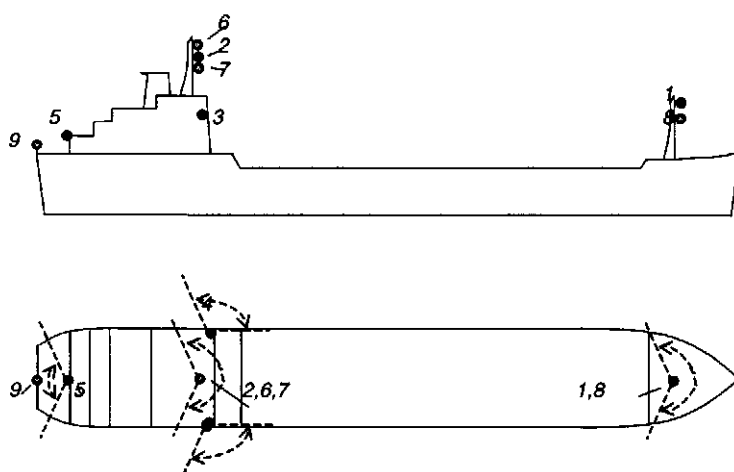
Na statkach pasażerskich oraz promach powinno być stosowane dodatkowe oświetlenie awaryjne (czasami określane jako oświetlenie ewakuacyjne) pomieszczeń ogólnego użytku oraz korytarzy. Oprawy tego oświetlenia są zasilane z akumulatorów umieszczonych najczęściej w korpusie oprawy. Akumulatory są normalnie podładowywane z sieci oświetleniowej i powinny w czasie awarii oświetlenia zapewnić działanie lampy przez trzy godziny.



### 13.6. Oświetlenie nawigacyjne

Oświetlenie nawigacyjne jest pojęciem stosowanym potocznie, właściwie powinno być określane ono jako latarnie sygnałowo-pozycyjne. Szczegółowe wymagania dotyczące latarni sygnałowo-pozycyjnych są ujęte w Międzynarodowym prawie drogi morskiej oraz pozaklasyfikacyjnych przepisach PRS cz. III. „Środki sygnałowe”. W niniejszej publikacji będą omówione jedynie podstawowe informacje na ten temat.

Każdy statek morski powinien posiadać co najmniej zestaw latarni przedstawiony na rys. 13.12.



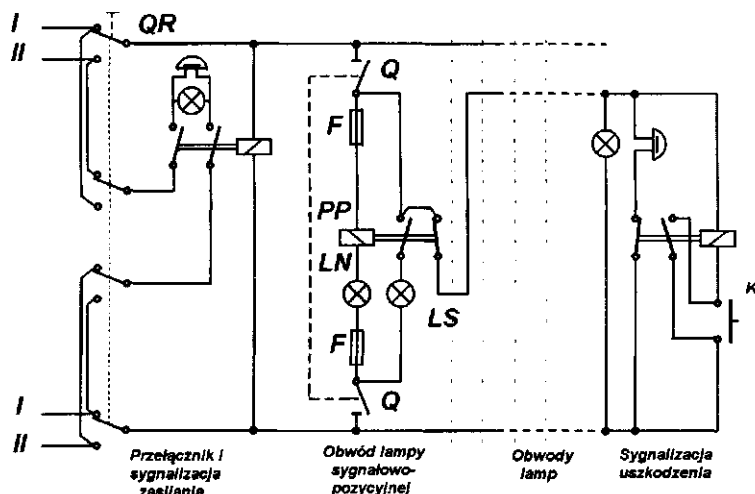
Nr na rys.	Nazwa światła	Kolor	Widoczność [mil m.]	Kąt rozsyłu [°]
1	Masztowe przednie	białe	6	225
2	Masztowe tylne	białe	6	225
3	Burtowe prawe	zielone	3	112,5
4	Burtowe lewe	czerwone	3	112,5
5	Rufowe	białe	3	135
6	Awaryjne górne	czerwone	3	360
7	Awaryjne dolne	czerwone	3	360
8	Kotwiczne przednie	białe	3	360
9	Kotwiczne tylne	białe	3	360

Rys. 13.12. Rozmieszczenie i charakterystyki latarni sygnałowo-pozycyjnych

Prócz wymienionych na rys. 13.12 świateł, statki o specjalnym przeznaczeniu mają światła dodatkowe, np.:

- holowniki - dwa światła białe umieszczone jedno pod drugim, oba o kącie rozsyłu 225°,
- statki rybackie - światło zielone i pod nim białe, oba o kącie rozsyłu 360°,
- statki pilotowe - światło białe i pod nim czerwone, oba o kącie rozsyłu 360°.

Źródłami światła w latarniach sygnałowo-pozycyjnych są specjalne żarówki o mocy 40 lub 60 W. Oprawy latarni są wyposażone w barwne szkła soczewkowe o takiej konstrukcji, aby światło latarni było widoczne w płaszczyźnie pionowej w zakresie  $\pm 10^\circ$  w stosunku do poziomu.



Rys. 13.13. Schemat zasilania latarni sygnałowo-pozycyjnych:

I - zasilanie podstawowe z rozdzielnic głównej (RG);

II - zasilanie z rozdzielnic awaryjnej (RA);

LN - żarówka latarni, LS - lampka sygnalizacyjna uszkodzenia latarni, PP - przekaźnik pomocniczy prądowy, Q - łącznik ręczny latarni, QR - przełącznik linii zasilających, ^f- przycisk kontroli prawidłowości działania sygnalizacji, F - bezpiecznik

Latarnie sygnałowo-pozycyjne ze względu na bardzo ważną funkcję, powinny mieć możliwość pracy we wszystkich warunkach eksploatacyjnych w sposób niezawodny.

Z tych względów każde światło nawigacyjne jest realizowane dwoma latarniami (lub jedną z dwoma żarówkami), z których jedna zasilana jest z sieci 220 V, a druga - z sieci 24 V (zasilanej z akumulatorów awaryjnych). Zasilanie 220 V rozdzielnic latarni sygnałowo-pozycyjnych (tzw. **tablicy świateł nawigacyjnych** - w skrócie TSN) powinno odbywać się z dwóch niezależnych obwodów. Jeżeli na statku jest awaryjny zespół prądotwórczy, to jeden z obwodów powinien być zasilany z rozdzielnic awaryjnej (RA). Tablica świateł nawigacyjnych oraz tablica zasilania latarni pomocniczych są zazwyczaj wykonywane jako elementy pulpitu nawigacyjnego statku.

Załoga pokładowa powinna być informowana o uszkodzeniu lub samoczynnym zgaśnięciu lampy. Należy pamiętać, że załoga w czasie pracy ma znacznie utrudnioną kontrolę wizualną świecenia poszczególnych latarni.

Schemat zasilania i sygnalizacji latarni sygnałowo-pozycyjnych pokazano na rys. 13.13. W obwodzie każdej latarni jest zainstalowany przekaźnik o wzbudzeniu prądowym (oznaczenie na rys. PP), który w przypadku zaniku prądu płynącego w obwodzie żarówki latarni (np. wskutek przepalenia się żarówki lub przerwania przewodów zasilających) włącza sygnalizację alarmową- dźwiękową i optyczną. Jednocześnie, oprócz alarmu ogólnego, styki przekaźnika *PP* załączają lampkę sygnalizacyjną *LS*, umieszczoną przy łączniku latarni *Q*, informując załogę o uszkodzeniu konkretnej latarni.

W przypadku zaniku napięcia w sieci zasilającej TSN przełącza się zasilanie TSN na drugi obwód przełącznikiem ręcznym *QR*.

## 14. Elektroenergetyka

### 14.1. Rozdział energii elektrycznej

#### 14.1.1. Układy sieci okrętowych

Na statkach dopuszczone są, przepisami PRS i międzynarodowymi, następujące układy rozdzielcze niskiego napięcia (do 1000 V) **prądu przemiennego**:

- 1) **trójfazowy, trójprzewodowy izolowany**;
- 2) trójfazowy, trójprzewodowy z uziemionym punktem zerowym;
- 3) trójfazowy, czteroprzewodowy z uziemionym punktem zerowym, lecz bez wykorzystania kadłuba jako przewodu powrotnego, dla napięć do 500 V;
- 4) **jednofazowy, dwuprzewodowy izolowany**;
- 5) jednofazowy dwuprzewodowy z uziemionym jednym przewodem, dla napięć do 500 V;

oraz prądu stałego:

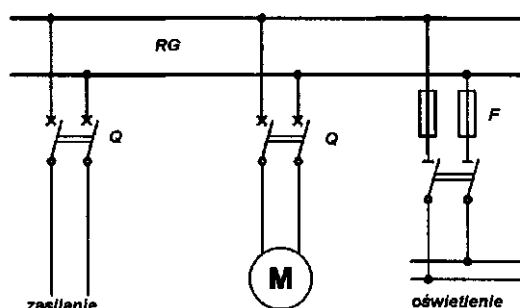
- 6) **dwuprzewodowy izolowany**;
- 7) jednoprzewodowy z wykorzystaniem kadłuba statku jako przewodu powrotnego dla napięć do 50 V;
- 8) dwuprzewodowy z jednym biegunem uziemionym;
- 9) trójprzewodowy z uziemionym punktem zerowym.

Pomimo dopuszczenia tak znacznej różnorodności układów, w praktyce najczęściej stosowane są układy wymienione w póż. 1, 4 i 6. Układy jednofazowe (rys. 14.1) spotyka się na małych jednostkach pływających (statki rybackie, holowniki, pomocnicze itp.), natomiast na statkach pełnomorskich stosuje się niemal wyłącznie układ trójfazowy (rys. 14.2) 3 x 380V 50Hz (tzw. **napięcie siłowe** - wytwarzane przez prądnice i stosowane do zasilania silników oraz dużych grzejników) i 3 x 220 V, 50 Hz (tzw. **napięcie oświetlenia** - uzyskiwane z transformatorów i używane do zasilania oświetlenia i ogrzewania wnętrza).

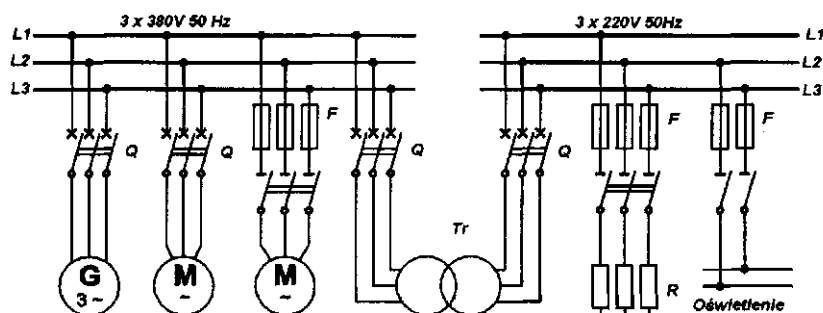
Na statkach budowanych według standardu anglosaskiego (eksploatowanych również we flocie polskiej) stosuje się sieć o napięciu 3 x 440 V, 60 Hz + 3 x 220 V, 60 Hz.

Układy te znalazły powszechne zastosowanie na jednostkach pływających głównie ze względu na:

- dużą dyspozycyjność układu, polegającą na pewności zasilania odbiorników, nawet przy doziemieniu jednej fazy czy bieguna;
- mniejsze zagrożenie pożarowe, pochodzące od prądu elektrycznego ze względu na małe wartości prądu doziemnego;
- zwiększone bezpieczeństwo porażeniowe, gdyż prąd rażenia w przypadku dotyku jednego bieguna lub fazy jest ograniczony impedancją izolacji pozostałych faz lub bieguna;
- możliwości ciągłej kontroli rezystancji izolacji.



Rys. 14.1. Układ dwuprzewodowy izolowany



Rys. 14.2. Układ trójfazowy, trójprzewodowy izolowany prądu przemiennego

W ostatnich latach w budownictwie okrętowym notuje się tendencje do podwyższenia napięć okrętowych systemów energetycznych (np. 3 x 660 V i więcej, nawet do 6 kV - patrz rys. 14.13 i 14.14), co jest spowodowane wzro-

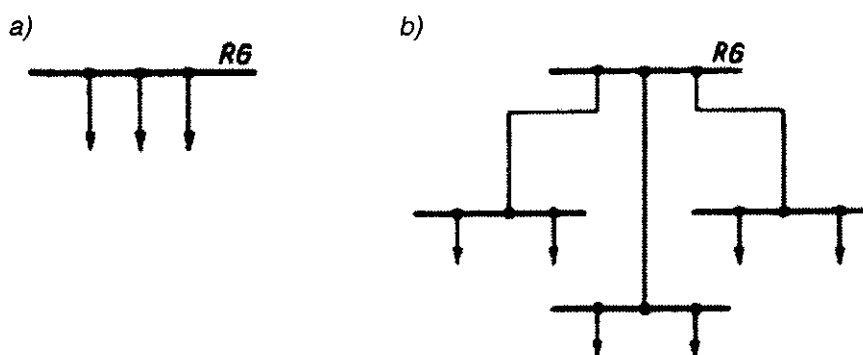
stem mocy zainstalowanej na statkach. Szczególnie jest przydatne na statkach z elektrycznymi silnikami napędu głównego. Wprowadzenie wyższych napięć umożliwia zmniejszenie przekrojów przewodów (mniejsze prądy przy takiej samej mocy przesyłanej) a także lżejszych konstrukcji łączników ze względu na mniejsze prądy zwarciove.

### 14.1.2. Systemy rozdziału i przesyłu energii elektrycznej

Głównym punktem rozdziału energii elektrycznej dostarczonej przez prądnicę jest **rozdzielnicza główna** (oznaczana w skrócie jako **RG** lub **GTR** - **główna tablica rozdzielcza**). Dalszy przesył energii może odbywać się:

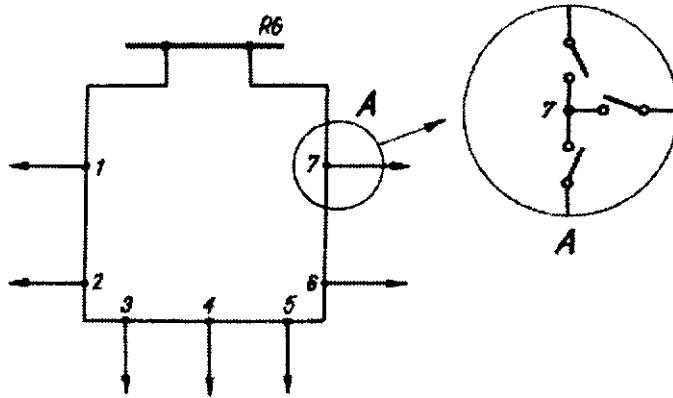
- bezpośrednio z **RG** do odbiorników (rozdział jednostopniowy);
- z **RG** zasilane są rozdzielnice pomocnicze, a te z kolei zasilają odbiorniki (rozdział 2-dwustopniowy);
- system mieszany, tzn., że część odbiorów zasilanych jest bezpośrednio z **RG** a inne z rozdzielnic pomocniczych, usytuowanych w pobliżu danej grupy urządzeń.

Każdy z ww. systemów jest **systemem promieniowym**.



Rys. 14.3. Podstawowy system rozdziału energii elektrycznej: a) promieniowy, jednostopniowy; b) promieniowy, dwustopniowy

Na okrętach wojennych, statkach specjalnych w całości lub w części systemu elektrycznego spotyka się zasilanie odbiorników w układzie pierścieniowym (okrężnym) - rys. 14.4. System ten pracuje niezawodnie, nawet gdy obwód w dowolnym miejscu będzie przerwany.

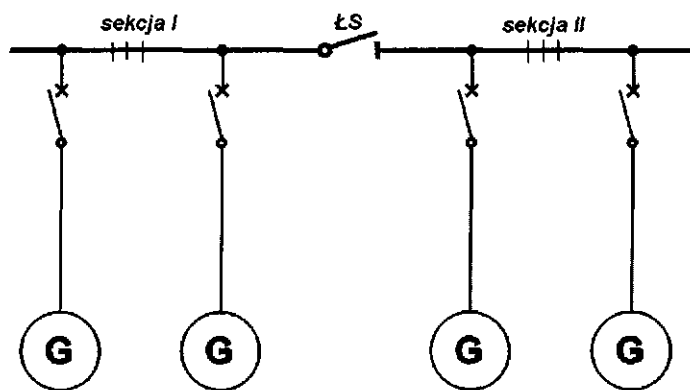


Rys. 14.4. Zasada pracy systemu pierścieniowego (okrężnego)

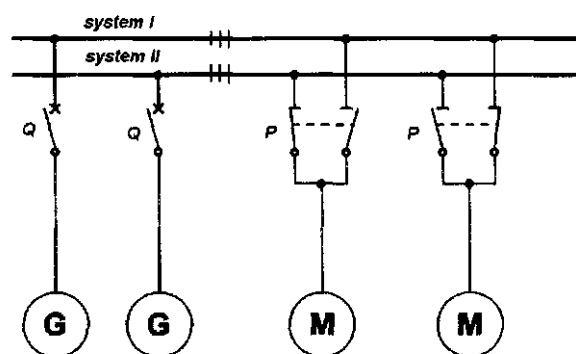
Niezależnie od układu i systemu rozdziału energii elektrycznej oraz typu zespołów prądowców, energię tę zawsze doprowadza się do szyn zbiorczych *RG* o takiej konfiguracji połączeń, aby były spełnione warunki **niezawodności i ciągłości zasilania odbiorników oraz łatwości obsługi, konserwacji i napraw**.

Ze względu na konfigurację połączeń prądnic z szynami zbiorczymi oraz na podział szyn, rozróżnia się następujące układy elektrowni okrętowych:

1. **Jeden niesekcjonowany system szyn zbiorczych.** Jest on stosowany na małych jednostkach pływających, zarówno do zasilania prądem stałym, jak i przemiennym. Wadą tego układu jest mała elastyczność i niezawodność eksploatacyjna. Remont i konserwacja szyn zbiorczych i niektórych elementów wyposażenia rozdzielni wymaga wyłączenia wszystkich prądnic.
2. **Jeden sekcjonowany system szyn zbiorczych.** Sekcjonowanie szyn zbiorczych polega na podziale szyn na kilka sekcji (rys. 14.5), których każda zasilana jest z oddzielnego generatora. W celu przeglądu, konserwacji lub naprawy uszkodzonej części, możemy odłączyć ją, a pozostałe będą pracowały normalnie.
3. **Podwójny system szyn zbiorczych.** Polega on na wbudowaniu w *RG* dwóch niezależnych niepołączonych ze sobą systemów szyn zbiorczych (rys. 14.6). Na każdy system pracuje co najmniej jedna prądnic. Odbiorniki zaś mogą być podłączone przez przełącznik do dowolnego systemu. W ten sposób uzyskaliśmy możliwość przeglądu lub remontu w stanie beznapięciowym jednego systemu szyn, przy możliwości pracy dowolnie wybranych mechanizmów, czego nie udało się zrobić przy systemie szyn podzielonych na dwie sekcje. Układ ten umożliwia zwiększenie sumarycznej mocy elektrowni, przy ograniczonym prądzie zwarcia wynikającym z mocy prądnic jednego systemu. Układ ten jest dość skomplikowany, drogi i dlatego nie jest stosowany.



Rys. 14.5. Schemat RG z szynami zbiorczymi podzielonymi odłącznikiem na dwie symetryczne sekcje, ŁS- łącznik szyn



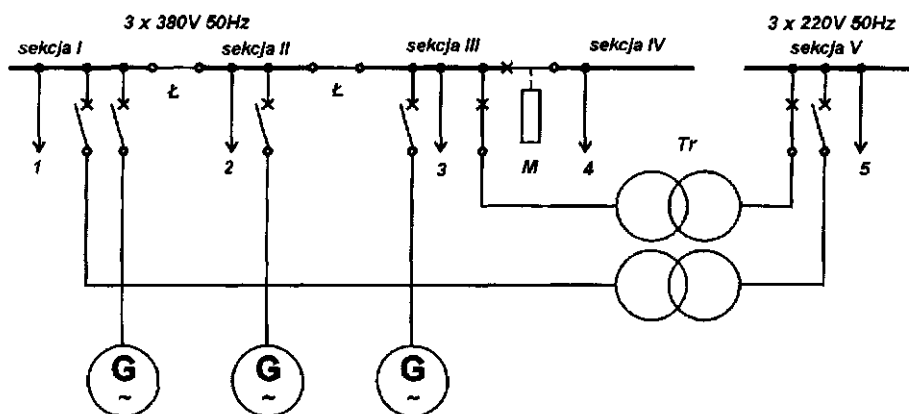
Rys. 14.6. Schemat RG z podwójnym systemem szyn zbiorczych

Uwzględniając zalety i wady wymienionych wyżej systemów szyn zbiorczych RG oraz wymagania Konwencji SOLAS 74 (prawidło 40) i przepisów PRS (część XI rozdz. 3), statki morskie najczęściej posiadają pojedynczy sekcjonowany system szyn zbiorczych, jak pokazano na rys. 14.7.

Podstawową zasadą podziału odbiorników energii elektrycznej na poszczególne sekcje jest następujący.

**Odbiory 1 i 3 są to odbiory ważne posiadające swoją rezerwę**, tj. zdublowane. Uzyskujemy w ten sposób jednakowe sekcje I i III symetryczne zarówno pod względem wielkości mocy, jak i spełnianej funkcji eksploatacyjnej. Wynika stąd możliwość wyłączenia sekcji I lub III do wykonania przeglądu lub remontu, bez zakłócenia pracy statku.





Rys. 14.7. Przykładowy schemat najczęściej stosowanego systemu szyn zbiorczych RG.  
*Ł* - łączniki sekcyjne, *M* - wyłącznik układu Mayera,  
*Tr* - transformatory, 1-5 - grupy odbiorów

**Odbiory 2** są to odbiorniki ważne nie posiadające swojej rezerwy, np. wciągarka kotwiczna, główna pompa pożarowa, główna sprężarka powietrza rozruchowego itp. Sekcja ta może być remontowana jedynie w wyjątkowych warunkach, a najczęściej w czasie wyłączenia zespołów prądowców elektrycznych.

**Odbiory 4** są to odbiorniki mniej ważne, które mogą być samoczynnie wyłączone w przypadku przeciążenia którejkolwiek prądnicy. Sekcja ta może być odłączona przez załogę do wykonania przeglądu, remontu a jednocześnie spełnia funkcję zabezpieczenia przeciążeniowego prądnicy. Do odbiorów tych zaliczamy ogrzewanie, kuchnię, klimatyzację, wentylację pomieszczeń itp. Wyłącznik (ozn. na rys. - *M*) wyłączający automatycznie te odbiory w przypadku przeciążenia nosi nazwę **wyłącznika Mayera**.

**Odbiory 5** są to odbiorniki zasilane napięciem 220 V. Głównym obciążeniem jest tu oświetlenie i ogrzewanie.

Tak skonstruowana rozdzielnica główna i podział odbiorów spełnia wszystkie wymagania przepisów Konwencji SOLAS i PRS, jak również wymienione uprzednio warunki eksploatacyjne.

## 14.2. Wytwarzanie energii elektrycznej

### 14.2.1. Główne źródła energii elektrycznej

Główne źródło energii elektrycznej jest to źródło **przeznaczone do dostarczenia energii elektrycznej** do rozdzielnic głównej w celu rozdzielenia energii do wszystkich urządzeń, koniecznych do utrzymania statku w **normalnych warunkach eksploatacyjnych i mieszkalnych** (Konwencja SOLAS część A, prawidło 3),

Moc zespołów prądotwórczych głównego źródła energii powinna być taka, aby w **przypadku unieruchomienia jednego z nich, było możliwe zasilanie urządzeń niezbędnych do zapewnienia normalnych warunków pracy** napędu statku, bezpieczeństwa oraz właściwych warunków bytowych załogi.

Wymagania te oznaczają, że na statku powinny być przewidziane co najmniej dwa zespoły prądotwórcze z niezależnym napędem, zdolne do pracy we wszystkich warunkach eksploatacyjnych.

Prądnice, a ściślej zespoły prądotwórcze powinny być zbudowane w sposób, który umożliwi wytwarzanie energii elektrycznej o parametrach znamionowych (najczęściej 400 V 50 Hz lub 450 V 60 Hz) z określoną dokładnością, a także daje możliwość pracy indywidualnej i równoległej (rodzaje prądnic okrętowych wraz ze sposobami ich regulacji omówione zostały w rozdz. 7).

Zapewnienie tych wymagań nie następuje większych trudności, gdy zastosowane zostały zespoły wolnostojące jednakowego typu, np. dieselgeneratory (*DG*), lub turbogeneratory (*TG*). Armatorzy i konstruktorzy statków, dążąc do zwiększenia oszczędności paliw, często stosują prądnice podwieszane lub napędzane od wału silnika głównego tzw. prądnice wałowe (*PW*).

Zastosowanie prądnicy wałowej jest bardzo korzystne dla eksploatacji siłowni okrętowej ze względu na lepszy ogólny współczynnik sprawności od *DG*. Dociążenie silnika głównego prądnicą wałową powoduje jego pracę w optymalnym zakresie obciążeń oraz stosowanie tańszego paliwa do *SG* sprawiają, że koszt wytwarzania energii elektrycznej jest dużo niższy niż przy pracy *DG*;

Prądnica wałowa może być wykorzystana w systemie energetycznym w przypadku śruby stałej tylko przy pracy silnika głównego (*5G*), tzn. w czasie jazdy w morzu, a przy śrubie nastawnej również w czasie manewrów. W czasie postoju statku musi być zapewniona dostawa energii z lądu. Z tego wynika, że prądnica wałowa na statku **najczęściej jest dodatkowym źródłem energii**, podczas gdy głównym źródłem energii są zespoły prądotwórcze wolnostojące.

Sposób współpracy prądnicy wałowej z okrętowym systemem elektroenergetycznym zależy od układu elektrowni. Dla wyjaśnienia tego problemu rozważmy pokrótce cechy pracy silników napędowych.

Silniki zespołów prądotwórczych wolnostojących *DG* są średnioobrotowe (500 do 1000 obr/min), a w związku z tym nierównomierność ich biegu jest ni-

ska. Duże koło zamachowe silnika napędu prądnicy w istotny sposób wyrównuje chwilowe wartości prędkości obrotowej.

Na obciążenie mocą czynną prądnicy przy pracy równoległej wpływamy (por. rozdz. 7.2.3) przez zmianę momentu napędowego. Przy napędzie silnikami spalinowymi moment ten regulujemy dopływem paliwa do cylindrów.

Jeżeli pracujące równoległe prądnice synchroniczne są napędzane silnikami o mocy porównywalnej z ich mocą, to rozdział mocy czynnej spełniają samoczynnie odpowiednio ustawione regulatory prędkości obrotowej silników spalinowych. Ustawienie regulatorów polega na dobraniu odpowiedniego statyzmu charakterystyki roboczej silnika (por. rozdz. 7.3).

Silnik główny SG budowany jest przeważnie na niską prędkość obrotową (120 do 150 obr/min), w związku z czym nierównomierność biegu jest większa niż DG. Dodatkowe impulsy są generowane również przy pracy śruby na wzburzonej powierzchni, od której skrzydeł powstają drgania w paśmie 5-10 Hz. Niezależnie od powyższego, w czasie pływania na wzburzonej powierzchni pojawia się niska częstotliwość wahań, wynikająca z trudnych warunków pracy regulatora obrotów SG. Oscylacje te są przekazywane przez PW do sieci odbiorczej lub do przekształtnika i jego częstotliwość.

W systemie energetycznym z bezpośrednim połączeniem PW z siecią odbiorczą zniekształcenia te mogą się objawić jako wahania napięcia; jeżeli są one odpowiednio duże, może wystąpić irytujące migotanie oświetlenia oraz nierównomierna praca silników elektrycznych. Przy bardzo wzburzonej powierzchni może zaistnieć konieczność zrezygnowania z pracy PW, ze względu na zakłócenia wprowadzone do systemu energetycznego.

W przypadku pracy równoległej prądnicy wałowej z wolnostojącym zespołem prądotwórczym DG te niedogodności powodują, że rozkład obciążeń mocą czynną będzie niestabilny i doprowadzi do wyłączeń prądnic, gdyż zadziałają ich zabezpieczenia. Zazwyczaj prądnice wałowe i wolnostojące łączy się do pracy równoległej tylko na okres przejęcia obciążenia. W przypadku konieczności wykorzystania obu źródeł (np. przy deficycie mocy) stosuje się podział sieci okrętowej na niezależne systemy, z których jeden jest zasilany z PW, a drugi z DG.

Jeżeli zostały zastosowane prądnice PW często, w celu stabilizacji częstotliwości, zachodzi techniczna potrzeba użycia przetwornika częstotliwości. Powodem takiego rozwiązania może być np. potrzeba długotrwałej pracy równoległej lub rozszerzenia zakresu pracy PW, przy śrubie napędowej o stałym skoku.

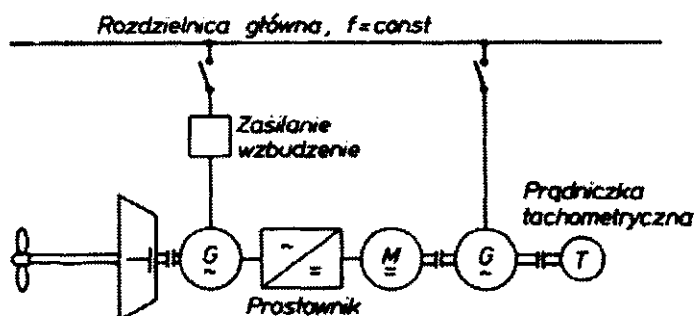
W zasadzie możemy wyróżnić dwa podstawowe typy przetworników częstotliwości: maszynowy (współcześnie już bardzo rzadko spotykany) oraz statyczny.

**Przetwornik maszynowy** (wirujący) jest układem maszyn elektrycznych silnik - prądnica (rys. 14.8). Do przetwornicy dostarcza się energię w postaci prądu stałego. Wytwarzanie energii może odbywać się:

- bezpośrednio w prądnicę prądu stałego,
- w prądnicę prądu przemiennego o częstotliwości i liczbie faz różnej od przemysłowej i wyprostowaniu na prąd stały,
- w prądnicę trójfazowej prądu przemiennego o częstotliwości przemysłowej i wyprostowaniu na prąd stały.

Jak wynika z powyższego, energia wytwarzana w prądnicę wałowej może charakteryzować się dość różnorodnymi parametrami oraz zmiennością częstotliwości. Różnorodność i zmienność częstotliwości eliminują się przez prostowanie na prąd stały. Energia prądu stałego zasila silnik napędowy prądu stałego, napędzający prądnicę trójfazową o częstotliwości i napięciu równym sieci okrętowej.

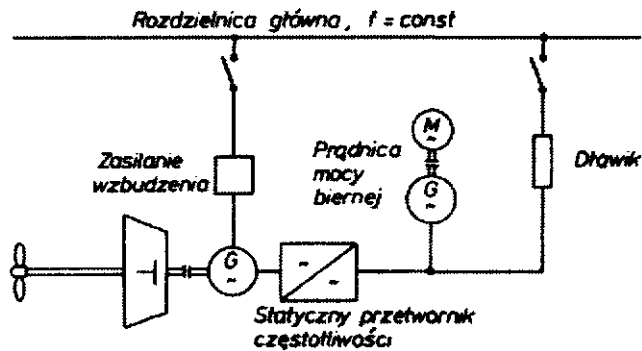
Dzięki łatwości stabilizacji zarówno częstotliwości, jak i napięcia - układ ten jest bardzo przydatny do pracy indywidualnej i równoległej. Zaletą układu jest również to, że wyprodukowana energia elektryczna nie wprowadza żadnych zakłóceń do sieci, a napięcie jest praktycznie sinusoidalne.



Rys. 14.8. Układ prądnicy wałowej z wirującym przetwornikiem częstotliwości

Jedynym ograniczeniem technicznym jest wielkość maszyny prądu stałego, która - ze względu na komutację - nie może być budowana na dowolnie dużą moc. Ze względu na kilkakrotne przetwarzanie energii elektrycznej sprawność układu jest stosunkowo niska, rzędu 85%.

**Energoelektroniczny przetwornik statyczny** jest rozwiązaniem stosunkowo nowym. Można go stosować w wyniku rozwoju techniki półprzewodnikowej. Koncepcję takiego układu z prądnicami synchronicznymi oraz przekształtnikiem z klasycznymi tyrystorami przedstawiono na rys. 14.9. Podobnie jak w układzie z przetwornikiem maszynowym, wytworzona energia w prądnicę wałowej może być o zmiennych i dość różnorodnych parametrach co do częstotliwości i liczby faz. Prąd przemienny z P W jest prostowany w pierwszym stopniu przetwornika, a następnie przetwarzany na prąd przemienny trójfazowy o stałej częstotliwości przemysłowej.

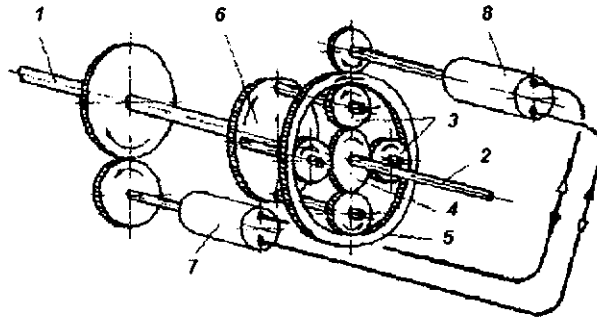


Rys. 14.9. Układ prądnicy wałowej ze statycznym przetwornikiem częstotliwości

Całkowita sprawność takiego układu jest rzędu 80%. Pomimo niewątpliwych zalet, układ ten ma również istotną wadę. Kształt krzywej napięcia na wyjściu z przetwornika jest daleki od ideału. Jest to krzywa odkształcona, zawierająca harmoniczne, wpływające niekorzystnie na jakość energii elektrycznej, dostarczanej do systemu elektroenergetycznego. Wywiera to ujemne skutki w czasie eksploatacji, np. wzrost strat w urządzeniach i maszynach elektrycznych, a w konsekwencji wzrost temperatury, elektromagnetyczne zakłócenia w obwodach sterowania, zabezpieczeń, zewnętrznej łączności itp. Przekształtniki statyczne tradycyjne zbudowane z tyrystorów mają ponadto istotną wadę - nie wytwarzają mocy biernej, co powoduje konieczność stosowania dodatkowej prądnicy synchronicznej wytwarzającej tylko moc bierną (tzw. kompensator synchroniczny). Współcześnie konstruowane przekształtniki budowane z tranzystorów IGBT nie mają tej wady, ale w konstrukcjach okrętowych są dopiero na etapie wdrażania.

Prądnice wałowe stosuje się na statkach w różnych wersjach.

1. Prądnice napędzane przez przekładnię są konstrukcyjnie zbliżone do prądnic zespołów pomocniczych, jednak stosuje się większą prędkość obrotową, tzn. 1000 - 1500 obr/min; przykład przekładni mechanicznej z regulacją i stabilizacją obrotów (tzw. „conspeed”) pokazano na rys. 14.10.
2. Prądnice napędzane bezpośrednio od silnika głównego - są one umieszczone na wale SG (obecnie rzadko stosowane) lub otrzymują napęd z wyprowadzonej końcówki wału korbowego z czoła silnika. W obu wypadkach prądnice mają obroty równe obrotom SG, tzn. 100 - 150 obr/min. Takie rozwiązanie pociąga za sobą konsekwencje rozwiązań konstrukcyjnych: dużą liczbę par biegunów, dużą średnicę, duży ciężar.



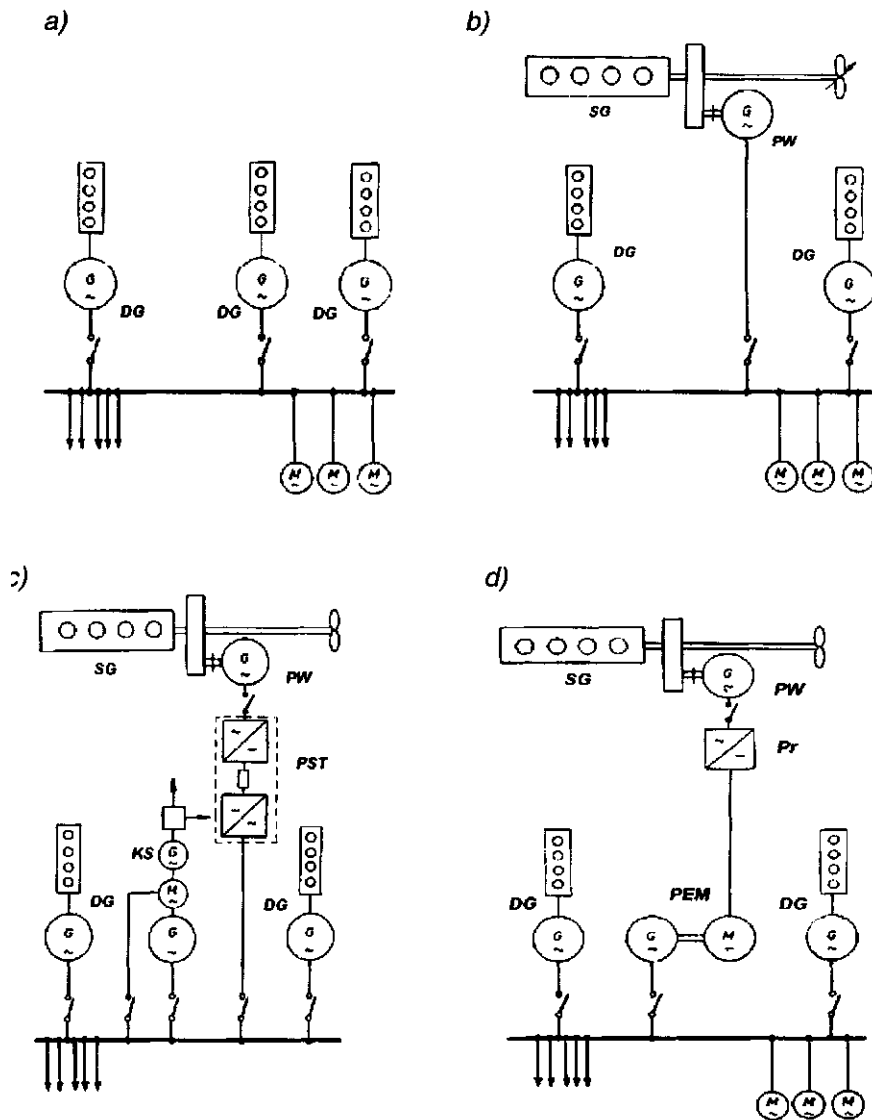
Rys. 14.10. Uproszczony schemat bezstopniowej przekładni planetarnej z hydrauliczną regulacją obrotów prądnicy wałowej:  
 1 - wał wejściowy, 2 - wał wyjściowy, 3 - satelity, 4 - koło słoneczne, 5 - koło pierścieniowe, 6 - jarzmo, 7 - pompa hydrauliczna, 8 - silnik hydrauliczny

**Układy elektrowni okrętowej** mogą być rozwiązane w różnorodny sposób. Teoretyczna liczba układów jest bardzo duża. Najczęściej jednak na statkach handlowych spotyka się układy elektrowni według poniższych rozwiązań.

- rys. 14.11 a - trzy zespoły prądotwórcze *DG* wolno stojące bez prądnicy wałowej;
- rys. 14.11 b - dwa zespoły prądotwórcze *DG* i jedna prądnica wałowa *PW* średnioobrotowa (pracująca wprost na *RG*) napędzana przez przekładnię (układ zalecany przy śrubie nastawnej);
- rys. 14.11 c - dwa zespoły prądotwórcze *DG* i jedna prądnica wałowa *PW* średnioobrotowa z przekładnią, przetwornikiem statycznym *PT* oraz kompensatorem synchronicznym *KS*;
- rys. 14.11 d - dwa zespoły prądotwórcze *DG* i jedna prądnica wałowa *PW* średnioobrotowa z przekładnią oraz przetwornicą elektromaszynową *PEM* (silnik prądu stałego i prądnica synchroniczna).

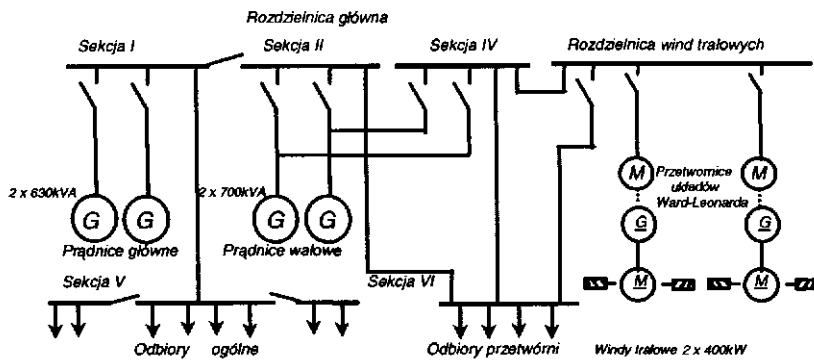
Prądnica wałowa w układzie przedstawionym na rys. 14.11 b może pracować tylko indywidualnie, bez możliwości długotrwałej pracy równoległej z zespołami prądotwórczymi wolno stojącymi. Zmiana pracujących prądnic i przejęcie obciążenia pomiędzy *DG* i *PW* następuje w drodze synchronizacji tych prądnic na krótki czas (około 15 s) oraz odłączeniu prądnicy pierwotnie pracującej. Odłączenie to może być ręczne lub automatyczne. Takie rozwiązanie daje możliwość płynnego przejmowania obciążeń i bezzakłóconą pracę systemu elektroenergetycznego. Układy elektrowni okrętowej z prądnicą wałową według

rys. 14.11 c i 14.11 d mogą pracować zarówno indywidualnie, jak i długotrwale równolegle z zespołami *DG*.

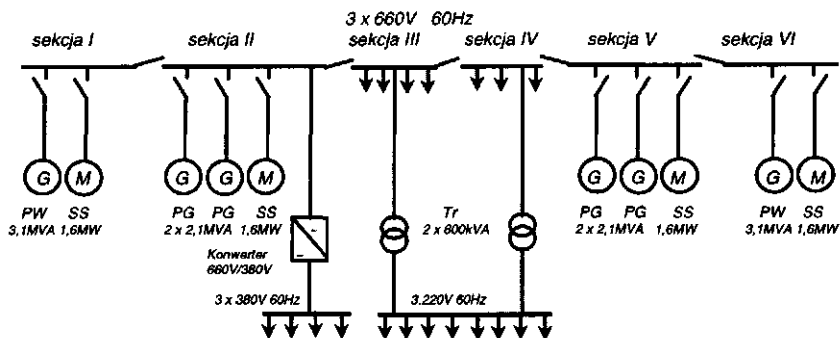


Rys. 14.11. Przykłady rozwiązań elektrowni statków handlowych  
 (opis szczegółowy w tekście): *SG* ~ silnik główny, *DG* -  
 prądnica wolnostojąca, *PW*- prądnica wałowa,  
*Pr* ~ prostownik, *PST* - statyczny przetwornik częstotliwości, *KS* -  
 kompensator synchroniczny, *PEM* - przetwornica elektromaszynowa

Statki pasażerskie, promy oraz statki rybackie (szczególnie trawlerzy - przetwórci oraz trawlerzy - zamrażalnie) mają elektrownie znacznie bardziej rozbudowane ze względu na większą moc zainstalowaną, liczbę odbiorników a także większą (2 - 4) liczbę prądnic wałowych. Przykłady takich elektrowni zostały pokazane na rys. 14.12, 14.13 i 14.14.

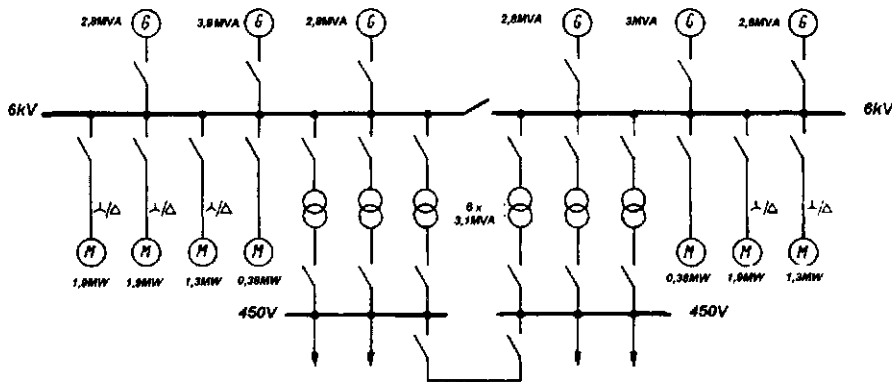


Rys. 14.12. Elektrownia trawlera przetwórci B418



Rys. 14.13. Elektrownia promu m/f „Polonia”: PG - pralnice główne, PW - prądnice wałowe, SS - stery strumieniowe





Rys. 14.13. Elektrownia statku pasażerskiego m/t „Norway”

### 14.2.2. Awaryjne źródła energii elektrycznej

Awaryjne źródło energii elektrycznej musi być zainstalowane na wszystkich statkach z własnym napędem, oprócz tych statków, gdzie podstawowym źródłem energii elektrycznej są baterie akumulatorów, a i to z pewnymi ograniczeniami.

Zadaniem awaryjnego źródła energii elektrycznej jest zasilanie wszystkich urządzeń elektrycznych, których praca jest wymagana w celu zapewnienia bezpieczeństwa statku w czasie awarii elektrowni podstawowej. Źródłem tym może być prądnica z niezależnym napędem silnikiem spalinowym (**prądnica awaryjna**) lub **bateria akumulatorów**.

Na statkach towarowych głównymi odbiornikami awaryjnej energii elektrycznej są:

- 1) oświetlenie awaryjne (patrz rozdział 13.4),
- 2) latarnie sygnałowo-pozycyjne (patrz rozdział 13.5),
- 3) środki łączności wewnętrznej, rozgłośnia dyspozycyjno-manewrowa i sygnalizacja alarmowa,
- 4) urządzenia radiowe i nawigacyjne (awaryjne),
- 5) instalacja wykrywcza pożaru,
- 6) wszystkie sygnalizacje wewnętrzne wymagane w czasie awarii,
- 7) oświetlenie stanowisk przy łodziach i tratwach ratunkowych oraz przestrzeni zaburtowych w miejscach opuszczania ich na wodę,
- 8) jedna z pomp pożarowych,
- 9) pompa zęzowo-balastowa,
- 10) urządzenie tryskaczowe,
- 11) maszyna sterowa (1 zespół);

(pozycje 9-11 nie obowiązują wtedy, gdy awaryjnym źródłem energii jest bateria akumulatorów).

**Czas pracy awaryjnego źródła** energii elektrycznej jest zależny od typu i wielkości statku. Dla **nieograniczonego** rejonu pływania powinien wynosić:

- |   |            |
|---|------------|
| - statki pasażerskie                                    | 36 godzin, |
| - statki towarowe o pojemności brutto 300 RT i większej | 18 godzin, |
| - statki towarowe o pojemności mniejszej od 300 RT      | 6 godzin.  |

Dla ograniczonych rejonów II i III czasy te mogą być odpowiednio skrócone.

Podstawowym sposobem uruchomienia źródła awaryjnego jest automatyczny układ sterowany zanikiem napięcia na szynach rozdzielnic głównej.

**Urządzenia rozruchowe** awaryjnych zespołów prądowców muszą mieć zapas energii na 3 kolejne rozruchy. Zespół awaryjny powinien posiadać dwa niezależne źródła energii do rozruchu. Łączny czas rozruchu i przejęcie obciążenia **powinien być krótszy od 45 s.**

Prądnice awaryjne winny posiadać sygnalizację przeciążenia, a w razie zwarcia zabezpieczenie powinno wyłączyć prądnicę. Baterie akumulatorów posiadają zabezpieczenie tylko od zwarć.

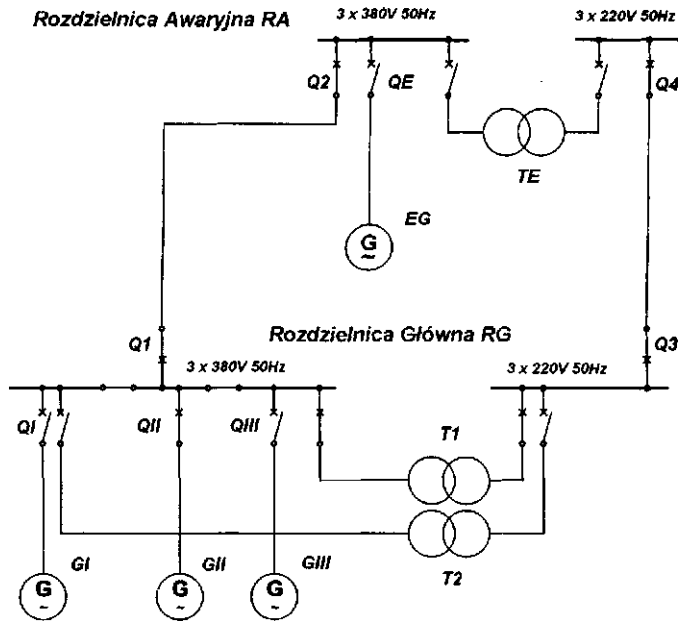
**Pomieszczenia awaryjnych źródeł energii elektrycznej** wraz z urządzeniami powinny być usytuowane powyżej najwyższego pokładu ciągłego, poza obrębem szybów maszynowych i za grodzią zderzeniową. Pomieszczenia te powinny być łatwo dostępne z otwartego pokładu.

**Rozdzielnica awaryjna (RA)** powinna być usytuowana w tym samym pomieszczeniu co zespół awaryjny z napędem niezależnym.

W przypadku zastosowania baterii akumulatorów jako awaryjnego źródła energii elektrycznej, rozdzielnica awaryjna powinna znajdować się w oddzielnym sąsiednim pomieszczeniu.

Na statkach może być zainstalowane **tymczasowe źródło energii elektrycznej** w postaci baterii akumulatorów zdolnej do zasilania oświetlenia awaryjnego, latarni sygnałowo-pozycyjnych i dźwiękowych środków sygnalizacji w czasie 30 **minut**. Ma ono zapewnić zasilanie podstawowych urządzeń awaryjnych na czas rozruchu i na wypadek nieudanego rozruchu awaryjnego dieselgeneratora (*EG - emergency generator*). Źródło to jest na statkach **obowiązkowe**, gdy czas rozruchu awaryjnego dieselgeneratora **przekracza 45 s**.

W normalnych warunkach eksploatacyjnych **rozdzielnica awaryjna RA** otrzymuje zasilanie z rozdzielnic głównej. Stan taki umożliwia pracę wszystkich odbiorników awaryjnych, przy wyłączonym zespole awaryjnym *EG*. Takie rozwiązanie jest wymagane zarówno przez Konwencję SOLAS 74, jak i przepisy towarzystw klasyfikacyjnych (rys. 14.15). Jak widać z rys. 14.15 rozdzielnica awaryjna jest połączona z rozdzielnicą główną dwoma kablami. Jeden łączy części rozdzielnic o napięciu 380 V a drugi 220 V.



Rys. 14.15. Współpraca RA z RG:

GI, GII, GIII — prądnice główne, EG - prądnica awaryjna, T1, T2 - transformatory główne, TE - transformator awaryjny, QI, QII, QIII, QE - wyłączniki główne prądnic

Podstawowy układ wykonany jest w ten sposób, żeby energia mogła przepływać tylko w jednym kierunku z RG do RA. Ten wymóg spełniony jest przez automatyczne odłączanie obwodów wyłącznikami Q2 i Q4, przy zaniku napięcia na RG. Wyłączniki QI i Q3 mają zadanie odłączenia obwodów w przypadku przeciążeń i zwarć w sieci awaryjnej w czasie zasilania z RG.

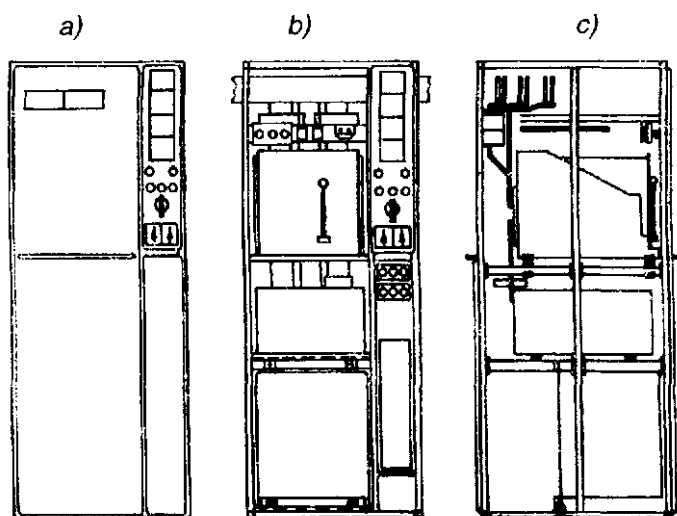
Nietypowe rozwiązania mogą pozwalać na warunkowy przesył energii z RA do RG, po uzgodnieniu z towarzystwem klasyfikacyjnym i odpowiednim zabezpieczeniu.

### 14.3. Rozdzielnice okrętowe

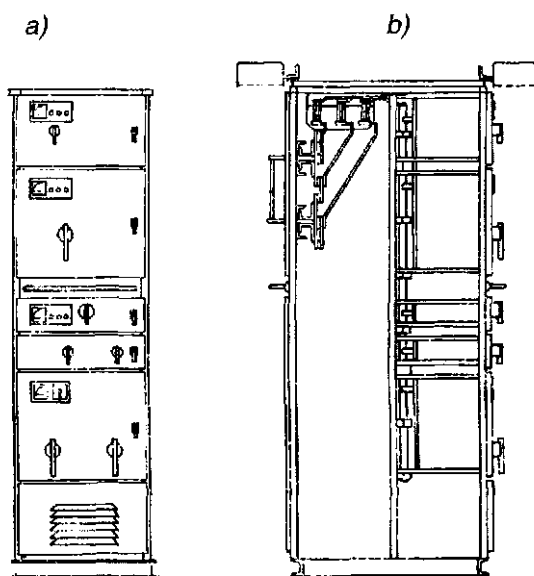
#### 14.3.1. Konstrukcja rozdzielnic

Rozdzielnica główna na statku jest centralnym węzłem systemu energetycznego. Umieszczona jest zazwyczaj w pomieszczeniu centrali manewrowo-kontrolnej (CMK) na poziomie pomostu maszynowni. Współczesne rozdzielnice są konstruowane w systemie kasetowo-szkieletowym, w którym poszczególne pola wykonane są w formie szkieletu z kątowników i wyposażone w moduły

o typowych przeznaczeniach, np. pole prądnicowe, odbiorów, pomiarów itp. Przykłady pól rozdzielnic głównej polskiej produkcji przedstawione są na rys. 14.16 i 14.17.

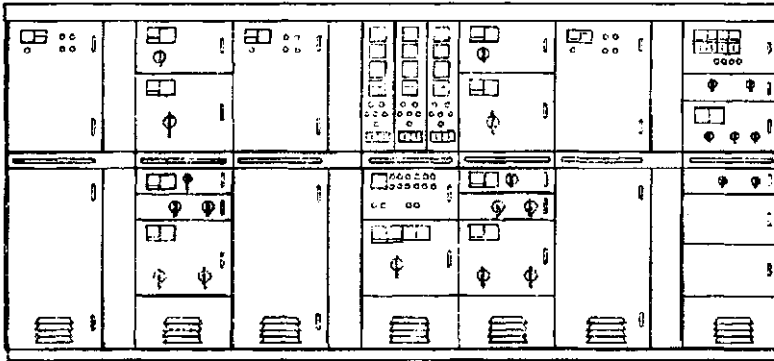


Rys. 14.16. Pole prądnicowe rozdzielnic głównej systemu RK prod. ELMOR: a) widok z przodu; b) widok z przodu po zdjęciu drzwi; c) przekrój boczny

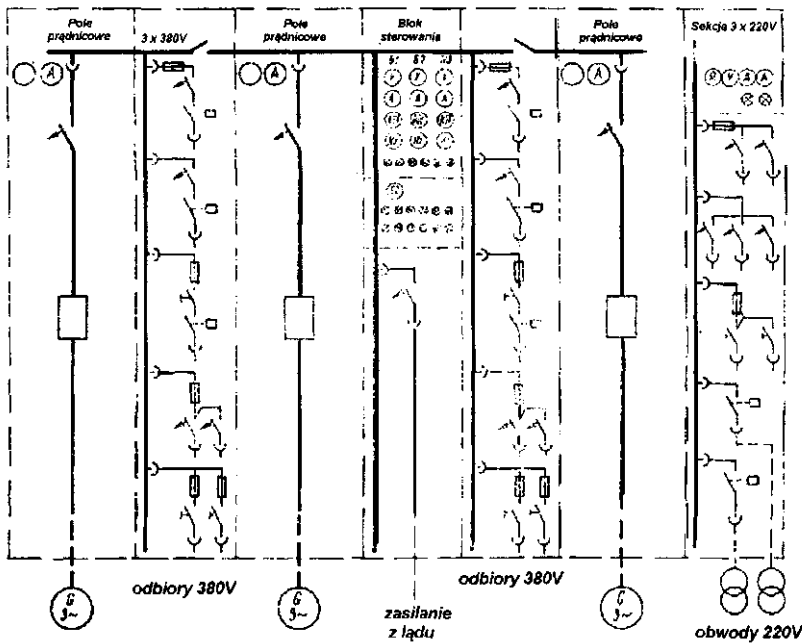


Rys. 14.17. Pole odbiorów rozdzielnic głównej systemu RK prod. ELMOR: a) widok z przodu; b) przekrój boczny

a)



b)



Rys. 14.18. Rozdzielnica główna statku handlowego systemu RK prod. ELMOR  
(schemat ogólny elektrowni tego statku - patrz rys. 14,15):  
a) widok z przodu; b) uproszczony schemat rozdzielnicy

Szyny zbiorcze rozdzielnicy przechodzą przez całą sekcję, tworzoną przez kilka pól. W polu prądnicowym umieszcza się aparaty oraz przyrządy zabezpieczające prądnicę i umożliwiające jej kontrolę i sterowanie. Pola rozdziału energii wyposaża się w łączniki i zabezpieczenia odbiorników przyłączanych bezpośrednio do *RG* oraz linii zasilających rozdzielnice pośredniczące. W polu sterowania koncentruje się zwykle aparaturę sterującą synchronizacją prądnic. Pole

to zawiera również dodatkową aparaturę pomiarowo-kontrolną systemu oraz wyłącznik zasilania z ładu. Kasetowa budowa rozdzielnic umożliwia składanie odpowiednich modułów, tworząc elementy dopasowane do wymogów rozdziału energii. Kasety połączone są z wewnętrznymi szynami zbiorczymi pola za pomocą styków wtykowo-zatrzaskowych. Kasetka w przypadku uszkodzenia może być bardzo szybko wymieniona, co znacznie skraca czas przerwy w dopływie energii. Przykład konstrukcji rozdzielnic głównej statku handlowego pokazano na rys. 14.18.

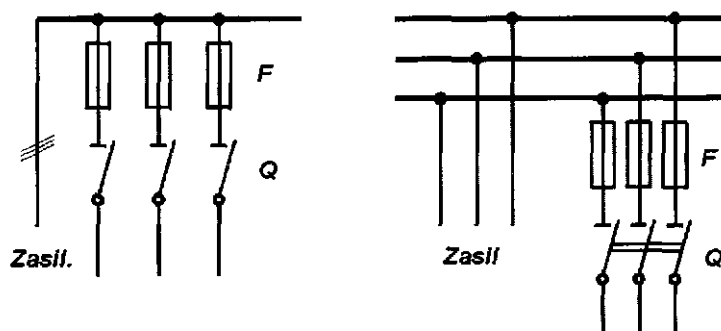
Rozdzielnice awaryjne są budowane z takich samych elementów jak rozdzielnice główne.

Rozdzielnice pomocnicze budowane są w formie skrzynek, zawierających łączniki, zabezpieczenia i aparaturę sterującą.

### 14.3.2. Układ aparatów w rozdzielnic

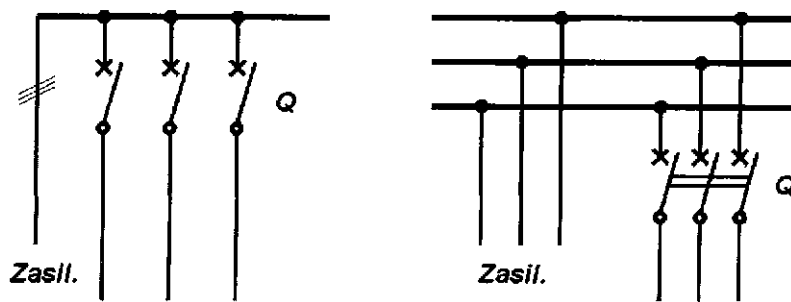
Aparaty elektryczne omówione w rozdziale 11 spełniają określone funkcje łączeniowe manewrowe lub zabezpieczeniowe. W rozdzielnicach głównych, awaryjnych i pomocniczych można wyróżnić kilka podstawowych układów, przedstawionych poniżej:

- a. Czynności łączeniowe wykonywane są łącznikami ręcznymi, a *zabezpieczenie* obwodu zrealizowane jest bezpiecznikami topikowymi. Ten typ układu aparatów stosuje się w obwodach o stosunkowo niewielkich prądach roboczych mniejszych od 200 A (rys. 14.19).



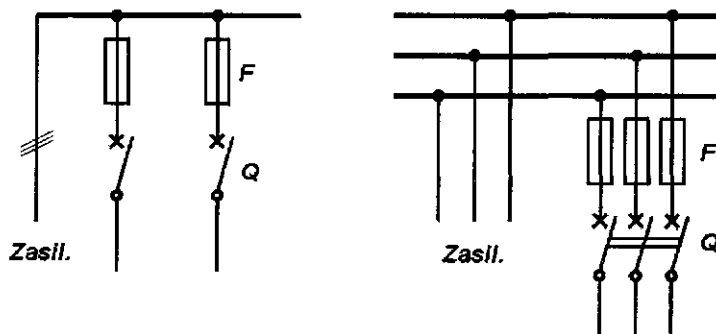
Rys. 14.19. Obwód z bezpiecznikami topikowymi i łącznikiem ręcznym

- b. Czynności łączeniowe i zabezpieczenie obwodu zrealizowane jest wyłącznikiem samoczynnym. Ten typ aparatu wraz z przekaźnikami zabezpieczeniowymi stosuje się w obwodach o dużych prądach roboczych większych od 200 A (rys. 14.20).



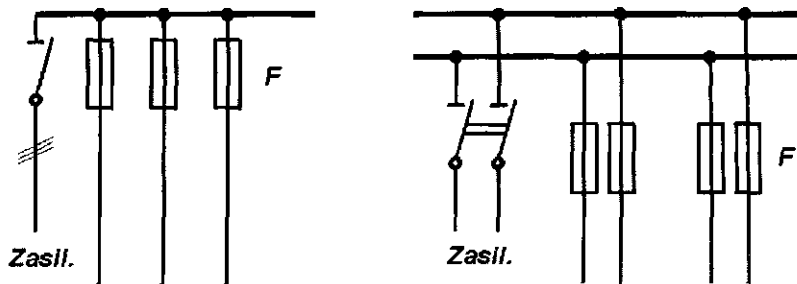
Rys. 14.20. Obwód z wyłącznikiem samoczynnym

- c. Czynności łączeniowe dokonywane są wyłącznikiem samoczynnym. Zabezpieczenie przeciążeniowe realizuje wyłącznik samoczynny. Zabezpieczenie zwarciove wykonane jest bezpiecznikiem topikowym (rys. 14.21). Układ ten podyktowany jest małą wytrzymałością zwarciovą wyłącznika samoczynnego i nazywa się **dobezpieczeniem wyłącznika**. Stosowany jest na ogół w obwodach o prądzie znamionowym większym od 320 A.



Rys. 14.21. Obwód z dobezpieczonym wyłącznikiem samoczynnym

W obwodach sieci awaryjnej, takich jak oświetlenie awaryjne i sygnalizacja awaryjna nie stosuje się łączników w poszczególnych obwodach. Odłączenie napięcia może być dokonane jedynie na zasilaniu. Obwody te mają zabezpieczenie tylko od zwarc. Z tych względów w rozdzielniczy najczęściej jest stosowany układ aparatów jak na rys. 14.22.



Rys. 14.22. Obwód oświetlenia awaryjnego z bezpiecznikami topikowymi

### 14.3.3. Zasilanie obwodów ważnych

Odbiorniki energii elektrycznej mogą być zasilane bezpośrednio z *RG* lub z rozdzielnic pomocniczych grupowych i końcowych. Odbiorniki ważne ze względu na bezpieczeństwo eksploatacji statku powinny być zasilane przy minimalnej ilości pośrednich stopni rozdziału, tzn. bezpośrednio z *RG*.

Według przepisów PRS cz. XI z **szyn rozdzielnic głównej** powinny być zasilane oddzielnymi obwodami następujące odbiorniki:

- 1) napędy elektryczne urządzeń sterowych;
- 2) napędy elektryczne urządzeń kotwicznych;
- 3) napędy elektryczne pomp pożarniczych;
- 4) napędy elektryczne pomp zęzowych;
- 5) napędy elektryczne sprężarek i pomp instalacji tryskaczowej;
- 6) żyrokompas;
- 7) rozdzielnica urządzeń chłodniczych ładowni;
- 8) napędy elektryczne zespołów wzbudzenia elektrycznego napędu głównego;
- 9) rozdzielnice grupowe oświetlenia podstawowego;
- 10) rozdzielnice urządzeń radiokomunikacyjnych;
- 11) rozdzielnice urządzeń nawigacyjnych;
- 12) rozdzielnice latarni sygnałowo-pozycyjnych;
- 13) rozdzielnice grupowe innych ważnych urządzeń, zgrupowanych na zasadzie jednorodności spełnianych przez nie funkcji;
- 14) rozdzielnice pulpitu sterowniczego-kontrolnego ruchu statku;
- 15) rozdzielnice automatycznych urządzeń wykrywczej sygnalizacji pożarowej;
- 16) napędy elektryczne mechanizmów zapewniających pracę napędu głównego;



- 17) rozdzielnice zasilające urządzenia ładunkowe, cumownicze, łodziowe, wentylacji i urządzeń grzewczych;
- 18) urządzenia sterowania śrub nastawnych;
- 19) urządzenia do ładowania baterii akumulatorów rozruchowych i baterii akumulatorów zasilających ważne urządzenia;
- 20) rozdzielnice zasilania napędów elektrycznych zamknięcia drzwi wodoszczelnych i urządzeń utrzymujących drzwi przeciwpożarowe w stanie otwartym oraz rozdzielnice sygnalizacji położenia zamknięcia drzwi wodoszczelnych i przeciwpożarowych;
- 21) rozdzielnice urządzeń chłodniczych instalacji gaśniczej z dwutlenkiem węgla o niskim ciśnieniu;
- 22) rozdzielnice oświetlenia hangarów i świateł sygnałowych lądowisk śmigłowców;
- 23) inne nie wymienione wyżej odbiorniki określone każdorazowo przez PRS.

Wymaganie to jest podstawowym (kierunkowym) rozwiązaniem, które może być złagodzone lub rozszerzone przez towarzystwo klasyfikacyjne dla konkretnego statku, jednak tylko w nieznacznym zakresie w stosunku do wymienionych powyżej wymagań.

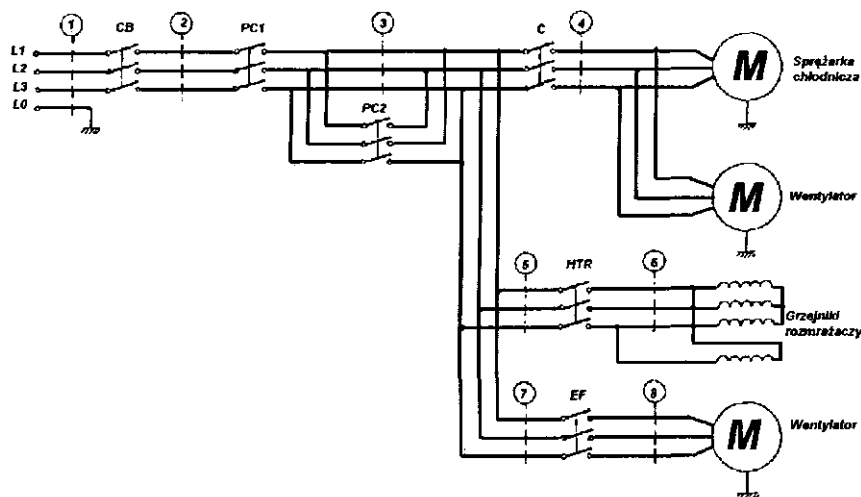
#### **14.3.4. Zasilanie kontenerów izotermicznych**

Kontenery izotermiczne ze względu na ich eksploatację stanowią złożony układ elektryczny, który przebywa drogą od dostawcy do odbiorcy, różnymi środkami transportowymi, a w związku z tym istnieje znaczne prawdopodobieństwo jego uszkodzenia. Z drugiej strony nieprawidłowo pracujący którykolwiek z kontenerów izotermicznych nie może spowodować wyłączenia innych, a szczególnie nie może zakłócać pracy okrętowego systemu elektroenergetycznego.

Względy niezawodności zasilania i bezpieczeństwa eksploatacji sprawiły, że zasilanie oraz sposób podłączania kontenerów izotermicznych do sieci okrętowej dokonywany jest w sposób szczególny.

Praca urządzeń kontenerów izotermicznych oraz parametry eksploatacyjne na współczesnych statkach coraz częściej są monitorowane wraz z sygnalizacją przekroczenia założonych parametrów. Wymaga to dalszego oprzyrządowania kontenerów oraz rozbudowania sieci kablowej sygnalizacyjnej.

Podstawowy układ elektryczny najczęściej stosowanych kontenerów izotermicznych przedstawia rys. 14.23.

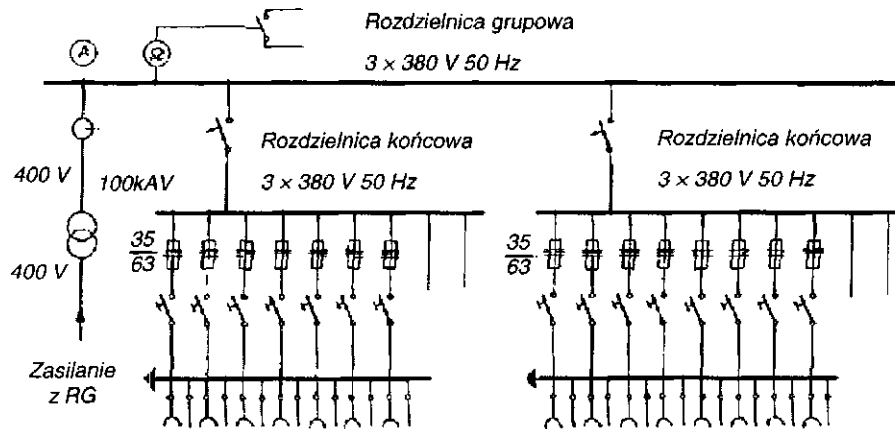


Rys. 14.23. Schemat instalacji elektrycznej kontenera izotermicznego typu Carrier M6d. 69ND137T-144

Zasilanie kontenerów izotermicznych na statkach powinno uwzględnić następujące wymagania:

- a) rozdzielnice kontenerów izotermicznych powinny być oddzielone od ogólnej sieci statku za pomocą transformatorów rozdzielających zasilanych z  $RG'$ ;
- b) każda rozdzielnica powinna posiadać aparaturę zapewniającą:
  - sygnalizację świetlną obecności napięcia na rozdzielnicy,
  - załączanie i wyłączanie każdego obwodu zasilającego gniazda wtyczkowe,
  - zabezpieczenie od zwarc obwodów zasilających.
  - pomiar rezystancji izolacji;
- c) zasilanie urządzeń elektrycznych kontenera izotermicznego z elektrycznej sieci statku powinno odbywać się poprzez gniazda wtyczkowe;
- d) uziemienie kontenera jest realizowane pośrednio na drodze - styk uziemiający we wtyczce - przewód uziemiający w kablu zasilającym gniazdo wtyczkowe - uziemienie w rozdzielnicy.

Przykładowy schemat zasilania kontenerów izotermicznych pokazano na rys. 14.24.

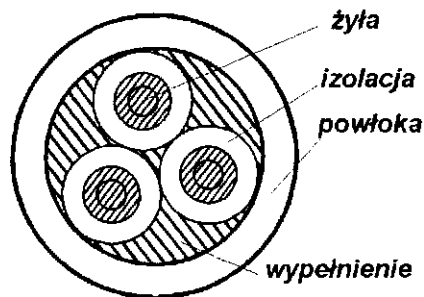


Rys. 14.24. Schemat zasadniczy zasilania kontenerów izotermicznych na statku typu B354

## 14.4. Przewody i kable okrętowe

### 14.4.1. Budowa przewodów elektrycznych

Przewód elektryczny w najprostszym wykonaniu składa się z **żyły i izolacji** (rys.14.25). Większość przewodów oprócz izolacji żyły, posiada jeszcze jedną warstwę izolacyjną zwaną **powłoką**.



Rys. 14.25. Przekrój poprzeczny kabla

Kablem elektrycznym nazywamy przewód izolowany wraz z powłoką służący do przewodzenia prądu elektrycznego w celu przesyłu energii lub sygnału elektrycznego i przystosowany do ciężkich warunków pracy.

Wszystkie materiały zastosowane do budowy kabli muszą być odporne na narażenia środowiskowe, występujące na statkach a szczególnie odporne na duże wilgotności, narażenia chemiczne i mechaniczne. Kable okrętowe kładzione w miejscach szczególnie narażonych na uszkodzenia mechaniczne mają oplot z drutów stalowych (o średnicy 0,3 lub 0,4 mm) nazywany **uzbrojeniem**.

Ze względu na przeznaczenie przewody i kable można podzielić na:

- **elektroenergetyczne**, stosowane w instalacjach siły, światła oraz sygnalizacji i sterowania;
- **telekomunikacyjne**, używane w instalacjach telefonicznych, telegraficznych, radiowych i telewizyjnych;
- **nawojowe**, przeznaczone do nawijania uzwojeń maszyn elektrycznych, transformatorów, elektromagnesów itd.

**Żyły** przewodów i kabli okrętowych są wykonywane z **miedzi elektroli-tycznej** jako **jednodrutowe i wielodrutowe** (przy przekrojach większych od 2,5 mm<sup>2</sup> stosuje się wyłącznie żyły wielodrutowe). W okrętownictwie stosuje się następujące przekroje znamionowe żył:

**0,5; 0,75; 1,0; 1,5; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120; 150 mm<sup>2</sup>.**

W obwodach sterowania i sygnalizacji stosuje się przekroje:

$S > 0,5 \text{ mm}^2$  do obwodów kontrolno-pomiarowych i łączności wewnętrznej,

$S > 0,75 \text{ mm}^2$  do obwodów sterowania i sygnalizacji nie zaliczanych do ważnych,

$S > 1,0 \text{ mm}^2$  do obwodów sterowania i sygnalizacji obwodów ważnych.

Jeżeli zastosowany rodzaj izolacji wpływa korodujące na żyły miedziane, wówczas stosuje się cynowanie jako ochronę przed korozją.

Żyły w okrętowych kablach teletechnicznych są jednodrutowe o przekroju 0,9 mm<sup>2</sup> (podaje się zwykle wtedy nie liczbę żył, lecz liczbę par żył).

**Izolacja** żył przewodów i kabli wykonywana jest z materiału stałego, mającego następujące cechy:

- dużą rezystywność,
- elastyczność,
- wytrzymałość termiczną,
- wytrzymałość mechaniczną,
- wytrzymałość elektryczną,
- odporność na rozwój mikrobakterii,
- odporność na wpływy chemiczne,
- odporność na wilgoć (nienasiąkliwość),
- powolny proces starzenia.

Według PRS materiałami izolacyjnymi kabli mogą być:

- polichlorek winylu zwykły, dopuszczalna temperatura pracy 60°C,
- polichlorek winylu ciepłoodporny, dopuszczalna temperatura pracy 75°C,
- guma etylenowo-propylenowa, dopuszczalna temperatura pracy 85°C,
- polichlorek usieciowiony, dopuszczalna temperatura pracy 85°C,
- guma silikonowa, dopuszczalna temperatura pracy 95°C.

Kable układane we wspólnym torze muszą być tego samego typu, tzn. o takiej samej dopuszczalnej temperaturze pracy.

Przewody nawojowe izolowane są emalią lub opłotem jedwabnym.

**Powłoką** służy do ochrony izolacji kabla przed wilgocią, działaniem środków chemicznych (np. oleju) oraz narażeniem mechanicznym. Powłoki wykonane są przeważnie z materiałów niemetalowych, jak polichlorek winylu lub guma, jednak w szczególnych przypadkach mogą być wykonane z ołowiu lub miedzi.

W przewodach używanych do połączeń ruchomych (nazywanych **przewodami oponowymi**) powłoka nosi nazwę **opony** i jest ruchoma względem izolacji, co powoduje, że przewód może być zginany bez obawy uszkodzenia izolacji.

Uzbrojenie kabli telekomunikacyjnych (wykorzystywane jednocześnie do ekranowania przewodu stąd nazwa - **ekran**) wykonywane jest z ocynkowanych drutów miedzianych.

Na statkach oprócz kabli spotyka się inne przewody, np. montażowe (do wykonywania połączeń wewnątrz urządzeń elektrycznych) oraz używane do zasilania odbiorników ruchomych. Odbiorniki ruchome zasilają się przewodami oponowymi. Przewody używane do zasilania drobnych odbiorników użytku domowego noszą nazwę sznurów (posiadają tylko jedną warstwę izolacyjną).

Przewody do prac spawalniczych są przewodami oponowymi, ale ich izolacja przystosowana jest tylko do niskich napięć i nie wolno ich wykorzystywać do innych celów.

Oznaczenie przewodu lub kabla składa się z liter określających rodzaj lub przeznaczenie przewodu, materiał izolacji i powłoki, ilość i przekrój żył oraz określenia dodatkowe. Różne wytwórnie zagraniczne mają swoje oznaczenia przewodów i kabli które bez znajomości danych katalogowych trudno jest je zidentyfikować. Przewody produkcji krajowej mają znormalizowane oznaczenia w podstawowej części:

- D - drut,
- L - linka,
- Lg - linka giętka,
- SM - sznur mieszkaniowy,
- OM - przewód oponowy mieszkaniowy,

- ÓW - przewód oponowy warsztatowy,
- OP - przewód oponowy przemysłowy,
- OS - przewód oponowy spawalniczy,
- KO - kabel okrętowy elektroenergetyczny,
- T - jako pierwsza litera oznaczenia - kabel telekomunikacyjny,
- G - z lewej strony symbolu KO - powłoka gumowa,
- Y - z lewej strony symbolu KO - powłoka polwinitowa,
- G - z prawej strony symbolu KO - izolacja z gumy,
- Y - z prawej strony symbolu KO - izolacja polwinitowa,
- c - z prawej strony - izolacja z materiału ciepłoodpornego,
- u - na końcu oznaczenia - kabel uzbrojony,
- ekw - na końcu oznaczenia - kabel ekranowany;

na przykład:

- LY - linka w izolacji polwinitowej,
- GKOG** - kabel okrętowy z izolacją i powłoką gumową,
- YKOY** - kabel okrętowy z izolacją i powłoką z polichlorku winylu,
- GKOGc** - kabel okrętowy z powłoką i izolacją z gumy ciepłoodpornej, **TGKOGekw** - kabel okrętowy telekomunikacyjny z izolacją i powłoką gumową.

Są to jedynie niektóre podstawowe oznaczenia. Dokładna identyfikacja może być dokonana według katalogu danej wytwórni.

#### 14.4.2. Znakowanie przewodów i kabli

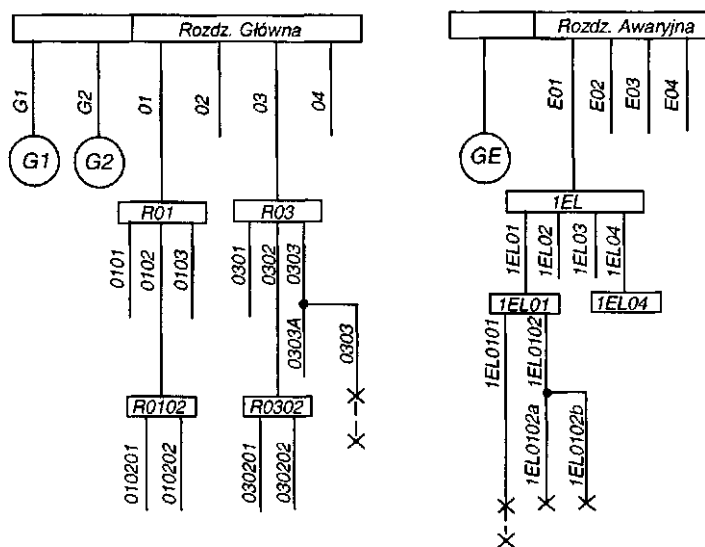
Wszystkie przewody i kable na statku muszą być oznakowane dla ułatwienia ich identyfikacji. **Wyróżnik przewodu** (kabla) powinien składać się z oznaczenia rodzaju sieci (jeżeli nie występuje w numerze obwodu) oraz numeru obwodu.

Podstawowe rodzaje sieci okrętowych należy oznaczać zgodnie z następującym kodem literowym:

- główna sieć energetyczna - nie oznacza się,
- sieć awaryjna o napięciu sieci głównej - E
- sieć bateryjna - B
- sieć teletechniczna - T
- sieć radiowa - R
- sieć elektronawigacyjna - N
- sieć dozoru (sygnalizacyjna, pomiarowa) - M
- sieć alarmowa - A
- sieć napędu głównego - P

Dla innych sieci dopuszcza się stosowanie innych oznaczeń literowych. Dopuszcza się także stosowanie oznaczeń uzupełniających, ściślej określających rodzaj sieci. Do tych celów zaleca się stosować pierwsze litery nazw w języku angielskim, aby pełne oznaczenie składało się z nie więcej niż trzech liter.

Obwody prądnicowe oznacza się wyróżnikami prądnic oraz w miarę potrzeby kolejną cyfrą arabską (rys. 14.26).

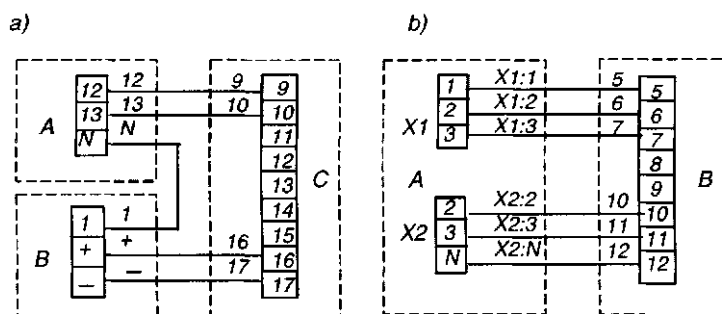


Rys. 14.26. Numeracja rozdzielni i przewodów okrętowych

Obwody odbiorcze oznacza się grupami liczb. Obwodom wychodzącym z rozdzielnic głównej nadaje się kolejne numery dwucyfrowe od 01 do 99. Jeżeli liczba obwodów przekracza 100, należy stosować numery trzycyfrowe od 001 do 999. Obwody wychodzące z rozdzielnic pomocniczych 1, 2 i dalszych rzędów oznacza się numerem złożonym z numeru obwodu zasilającego daną rozdzielnicę oraz dwucyfrowego kolejnego numeru od 01 do 99, np. 0101, 010101 itd. Zamiast kolejnych numerów dwucyfrowych można stosować kolejne litery alfabetu (rys. 14.26). Rozdzielnice pomocnicze zaleca się numerować zgodnie z rys. 14.26, z następującymi wyjątkami:

- a) rozdzielnica zasilana z obwodu głównego i rezerwowego (lub awaryjnego) otrzymuje numer obwodu głównego;
- b) rozdzielnicę zasilaną z dwu obwodów równorzędnych oznacza się niższym z numerów obwodów zasilających; numery obwodów wychodzących z takiej rozdzielniczy składają się z numeru rozdzielniczy i kolejnego numeru obwodu.

**Numer żyły** kabla lub przewodu powinien być identyczny z numerem zacisku urządzenia, do którego jest przyłączony dany koniec żyły (rys. 14.27 a). W przypadku, gdy urządzenie zawiera kilka listew zaciskowych o takich samych numerach, należy podawać numer listwy i zacisku (rys. 14.27 b).



Rys. 14.27. Numeracja żył przewodów

W przypadku, gdy zacisk nie jest oznaczony numerem, lecz znakiem graficznym lub oznaczeniem literowo-cyfrowym biegunowości albo fazy, można stosować zamiennie oznaczenie żył barwami według kodu podanego poniżej:

Przeznaczenie przewodu	Oznaczenie literowo-cyfrowe wg PN-90/E-01242	Oznaczenie barwą wg PN-90/E-05023
Przewód dodatni	L+ lub +	czerwona
Przewód ujemny	L- lub -	ciemnoniebieska
Przewód fazy 1	L1	żółta
Przewód fazy 2	L2	zielona
Przewód fazy 3	L3	fioletowa
Przewód neutralny	N	jasnoniebieska
Przewód uziemiający	E	żółto-zielone paski

Jeżeli barwa żyły jest niezgodna z powyższym kodem, żyłę oznacza się barwnym paskiem o szerokości co najmniej 5 mm, otaczającym żyłę na co najmniej 1/3 obwodu i o barwie zgodnej z kodem.



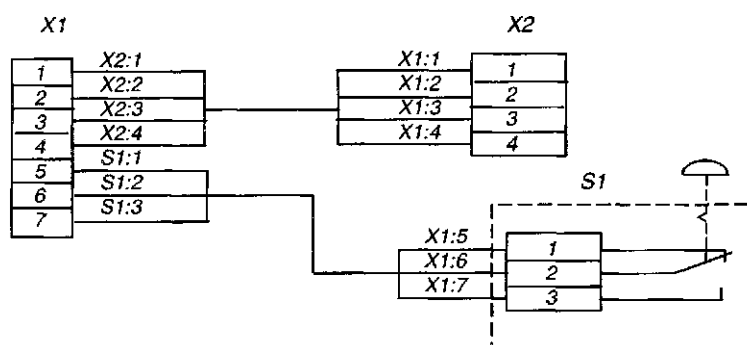
Żyły przewodów i kabli powinny być oznaczone tylko wtedy, gdy jest to niezbędne. Oznaczenie numeru żyły należy umieszczać na żyły, w sposób zapewniający łatwą identyfikację przy montażu, w czasie eksploatacji i remontów.

### 14.4.3. Opisy przewodów podawane na schematach

Opisy żył kabli i przewodów na schematach należy stosować tylko wtedy, gdy jest to niezbędne do identyfikacji żyły i odpowiadających jej zacisków. Nad symbolem końca żyły przyłączonego do danego zacisku określonej listwy zaciskowej należy umieścić adres zacisku, do którego jest przyłączony drugi koniec tej żyły (rys. 14.28).

Dopuszcza się zamieszczanie adresu tylko na jednym końcu żyły. Powinien on zawierać oznaczenie listwy zaciskowej i oddzielony od niego dwukropkiem numer zacisku. W miarę potrzeby adres winien być poprzedzony oznaczeniem kodowym urządzenia.

W przypadku, gdy żyły są łączone bezpośrednio z zaciskami urządzenia bez listwy zaciskowej, adres powinien zawierać oznaczenie kodowe tego urządzenia i oddzielony od niego dwukropkiem numer zacisku.



Rys. 14.28. Oznaczanie końcówek przewodów na schematach

## 15. Bezpieczeństwo pracy przy urządzeniach elektrycznych

### 15.1. Zagrożenia porażeniem - przyczyny i skutki

Przyczyny wypadków przy eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych są różne. Przeważnie są to: nieostrożność, lekceważenie istniejących przepisów, roztargnienie, omyłki, brak odpowiedniej konserwacji lub kontroli urządzeń zabezpieczających, zła organizacja pracy, brak nadzoru, źle zrozumiane polecenie, niedbałe wykonanie pracy, nieznajomość instrukcji oraz nieszczęśliwy zbieg okoliczności występujący oddzielnie lub łącznie.

Następstwem tych okoliczności jest najczęściej dotknięcie części znajdujących się normalnie lub przypadkowo pod napięciem względem ziemi, np. dotknięcie odizolowanego przewodu, zacisku lub obudowy uszkodzonej maszyny.

Jeżeli dotykający stoi na ziemi, na przewodzącej podłodze lub konstrukcji stalowej, to pod działaniem napięcia dotykowego nastąpi przepływ prądu przez jego ciało. Skutki przepływu prądu elektrycznego przez ciało ludzi są przedmiotem studiów i eksperymentów od wielu lat. Obecnie za najbardziej wyczerpującą publikację dotyczącą skutków przepływu prądu elektrycznego przez ciało człowieka należy uznać „IEC Report Publ. 479-1”. Ustalenia tam zawarte są zadowalająco wiarygodne i odpowiadają aktualnemu stanowi wiedzy w tym zakresie. Raport określa trzy zasadnicze problemy:

- skutki powodowane przepływem prądu elektrycznego przez ciało człowieka w zależności od częstotliwości, wartości i czasu przepływu;
- impedancję ciała ludzkiego w zależności od częstotliwości prądu, napięcia dotykowego, wilgotności naskórka, powierzchni styku elektrod z ciałem ludzkim, nacisku elektrod na ciało, temperatury otoczenia itp.;
- ujednoczone metody pomiaru impedancji ciała ludzkiego, technika przeprowadzania pomiarów, itp.

Międzynarodowe uzgodnienia w tym zakresie pozwalają na ustalenia zależności pomiędzy napięciem dotyku a czasem jego utrzymania się bez powodowania niebezpiecznych skutków patofizjologicznych dla ciała człowieka.

Prąd przepływający przez ciało człowieka w chwili rażenia nazywamy **prądem rażenia  $I_r$** , i określamy wzorem:

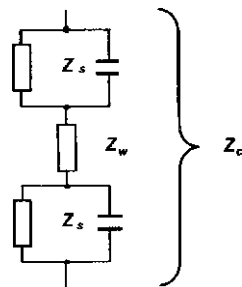
$$I_r = \frac{U_d}{Z_c} \quad (15.1)$$

gdzie:

- $U_d$  - napięcie dotyku (napięcie rażenia),  $Z_c$  - impedancja ciała człowieka.

Impedancja ciała człowieka nie jest wartością stałą. Zależy od częstotliwości prądu, wilgotności skóry, napięcia dotykowego, warunków, w których ten dotyk nastąpił i miejsca dotyku do ciała.

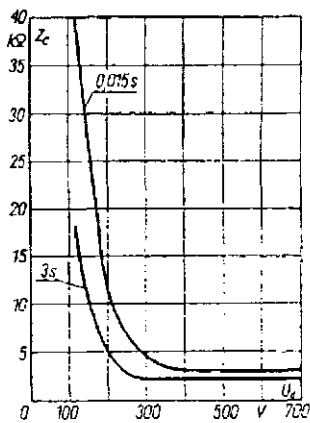
Model ciała ludzkiego jako impedancję przedstawia rysunek 15.1.



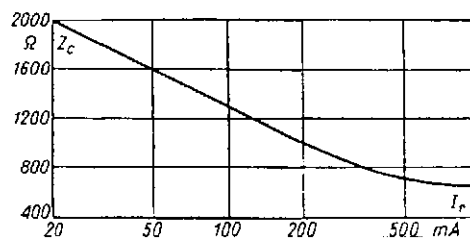
Rys. 15.1. Schemat zastępczy ciała ludzkiego:

$Z_v$  - impedancja skóry w miejscu dotyku,  $Z_w$  - impedancja wewnętrzna,  $Z_c$  - impedancja całkowita ciała

a)



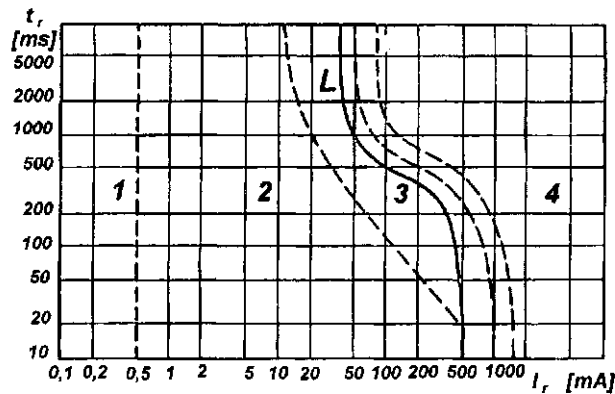
b)



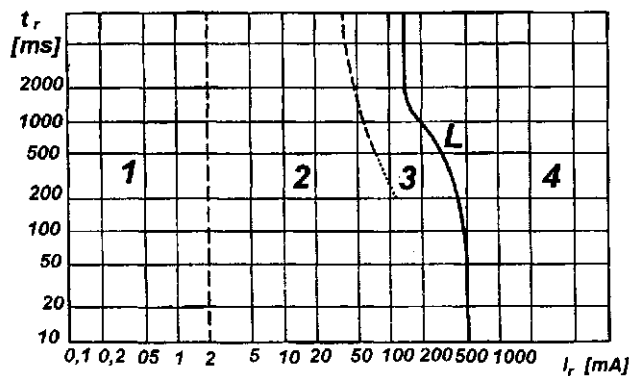
Rys. 15.2. Zależności impedancji ciała ludzkiego  $Z_c$  od napięcia dotyku  $U_d$  (a), przy dotknięciu trwającym 0,015 i 3 s i prądu rażenia  $I_r$  (b) według IEC

# T

a)



b)



Rys. 15.3. Strefy oddziaływania prądu przemiennego na ciało ludzkie, według IEC 479-1: a) rażenie prądem przemiennym; b) rażenie prądem stałym

Przy niskich napięciach dotykowych impedancja skóry jest znaczącym składnikiem impedancji całkowitej. W miarę wzrostu napięcia dotykowego składnik ten staje się coraz mniejszy i pomijalnie mały przy napięciach dotykowych przekraczających 150V. Impedancja skóry maleje ze zwiększeniem się częstotliwości prądu i stopnia zawilgocenia skóry. Przy wilgotności względnej otaczającego powietrza przekraczającej 75%, jak i również przy wyższych napięciach dotykowych impedancja ciała zależy wyłącznie od impedancji wewnętrznej. W praktyce można przyjąć, iż impedancja ciała ludzkiego jest jednakoowa dla najczęściej spotykanych dróg przepływu prądu rażenia: ręka - ręka, ręka - noga.

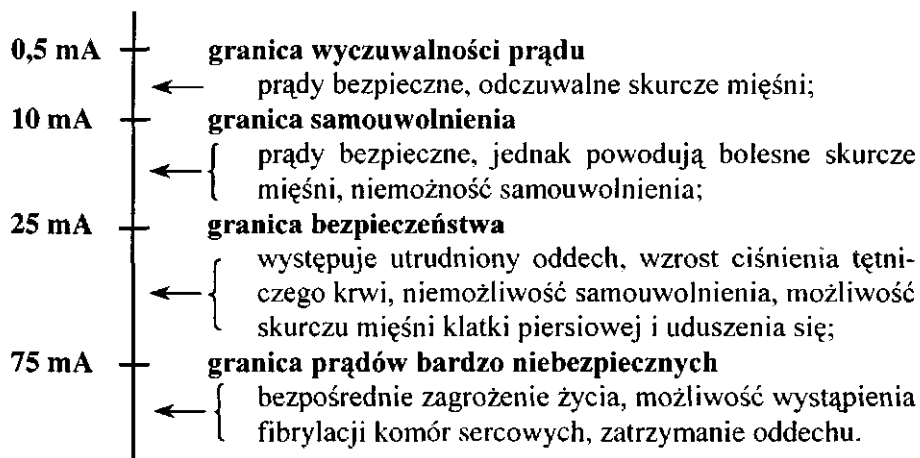
Na rysunku 15.3 a przedstawiono podział na strefy oddziaływania prądu przemiennego o częstotliwościach 15 - 100 Hz na ciało ludzkie w zależności od rodzaju i wartości prądu rażenia i czasu przepływu.

Rozróżnia się następujące strefy:

1. Brak reakcji organizmu.
2. Zwykle nie występują żadne niebezpieczne skutki patofizjologiczne.
3. Zwykle nie występują żadne uszkodzenia organizmu, możliwe skurcze mięśni, trudności w oddychaniu, przejściowe zaburzenia pracy serca bez wystąpienia fibrylacji (migotania komór serca), wzrastające zagrożenie wraz ze wzrostem prądu rażenia i czasu działania.
4. Zaburzenia jak w 3 strefie oraz możliwość wystąpienia migotania komór serca; w miarę zwiększania prądu i czasu przepływu pojawiają się skutki patofizjologiczne takie jak: zatrzymanie pracy serca, zatrzymanie oddechu, mogą występować poważne poparzenia.

W 3 strefie, w której mogą występować zaburzenia pracy organizmu nie pozostawiające trwałych skutków znajduje się krzywa L, którą uznaje się za krzywą bezpiecznego prądu rażenia w zależności od czasu przepływu przez ludzkie ciało (próg bezpieczeństwa dla 4 strefy). Przypadki porażenia prądem stałym zdarzają się nieporównywalnie rzadziej niż prądem przemiennym. Wynika to nie tylko ze sporadycznego stosowania tego prądu, ale również ze znacznie większej odporności organizmu ludzkiego na jego działanie. Na rysunku 15.3 b przedstawiono wpływ przepływu prądu stałego na ciało ludzkie. W obrębie stref 1, 2, 3 i 4 występują analogiczne objawy, jak w przypadku prądu zmiennego. Dla uzyskania tych samych objawów wartość prądu stałego musi być od 2-5-4 razy większa od wartości prądu przemiennego.

Na podstawie przytoczonych wyżej wykresów można przyjąć dla prądu przemiennego następujące granice:



Na podstawie powyższego wykresu IEC przyjmuje jako wartość graniczną długotrwałego dopuszczalnego prądu rażenia **10 m A**.

Jak podano powyżej impedancja ciała ludzkiego zależy przede wszystkim od wartości napięcia dotykowego i warunków środowiskowych, wpływających na stan naskórka. Nie jest możliwe bardzo precyzyjne określenie warunków środowiskowych na zagrożenie porażeniem; dlatego wprowadzono uproszczony podział:

- **warunki normalne**, w których skóra jest sucha, nie zabrudzona, temperatura umiarkowana, podłogi wykonane z materiałów nie przewodzących itp. (nie ma zwiększonego zagrożenia porażeniem);
- **warunki szczególne**, w których skóra jest wilgotna, zabrudzona substancjami przewodzącymi, temperatura wyższa od normalnej (występuje pocenie), podłogi wykonane z materiałów przewodzących itp. (istnieje zwiększone zagrożenie porażeniem).

Tabela 15.1 przedstawia przykładowe wartości impedancji i prądu przemiennego płynącego przez ciało ludzkie oraz maksymalny czas wyłączenia napięcia zasilającego w funkcji napięcia dotykowego w warunkach normalnych i szczególnych według Raportu IEC 479.

Tabela 15.1

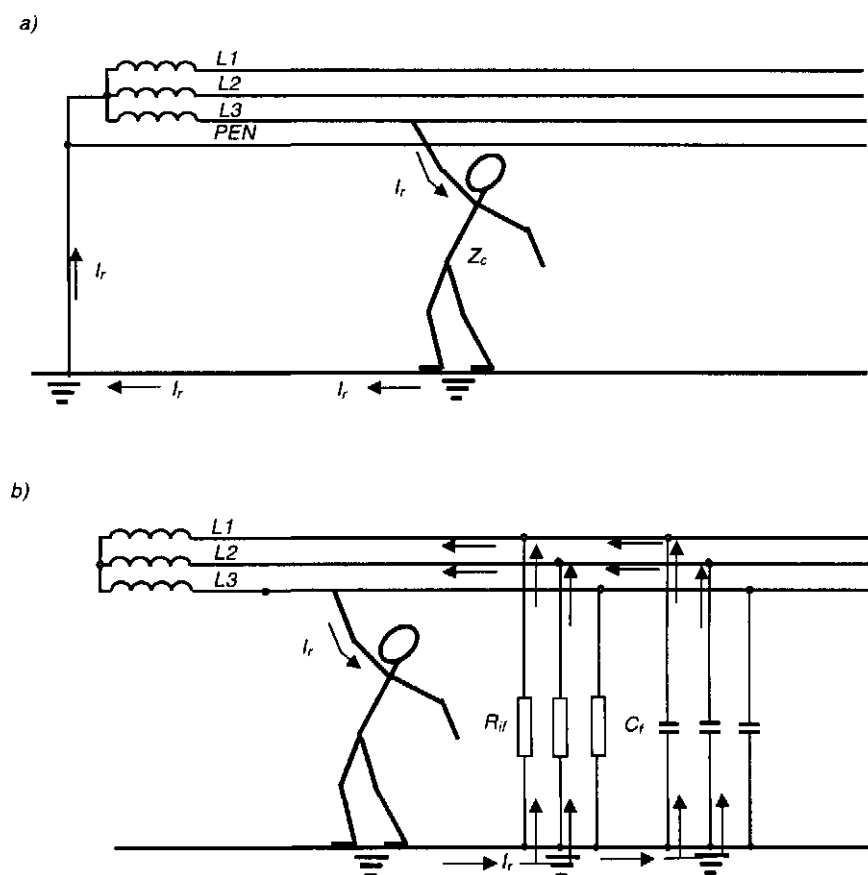
Wartości impedancji i prądu płynącego przez ciało człowieka oraz maksymalnego czasu wyłączenia w funkcji napięcia

Napięcie dotykowe	Warunki normalne			Warunki szczególne		
	impedancja ciała	prąd rażenia	maks. czas wyłączenia	impedancja ciała	prąd rażenia	maks. czas wyłączenia
V	$\Omega$	mA	s	$\Omega$	mA	s
25	–	–	–	1075	23	5
50	1725	29	5	925	54	0.48
75	1625	46	0.60	825	91	0.30
100	1600	62	0.40	800	125	0.22
150	1550	97	0.28	740	203	0.012
230	1500	153	0.17	700	329	0.05
300	1400	203	0.12	660	454	0.025
400	1450	276	0.07	–	–	–

Polska norma PN-92/E-05009/41 nie podaje jednoznacznie wartości prądów rażenia i napięć dotykowych, które uznaje się za dopuszczalne przy rażeniach krótkotrwałych. Jednakże przy omawianiu ochrony dodatkowej odwołuje

się do normy IEC 479 i przytoczonej powyżej tabeli, z której wynika, że graniczne, **dopuszczalne długotrwałe napięcia dotykowe** są równe 50 V dla prądu przemiennego i 120 V dla prądu stałego nietętniącego, a w **warunkach zwiększonego zagrożenia** napięcia są o połowę niższe i wynoszą 25 i 60 V. Powyższe wartości napięć potocznie są nazywane **napięciami bezpiecznymi**.

Droga i wielkość prądu rażenia zależy od rodzaju sieci. W sieciach cztero- i pięcioprzewodowych typu TN (rys. 15.4 a) przypadkowe dotknięcie przewodu fazowego (przy skutecznym kontakcie człowieka z przedmiotami uziemionymi) powoduje porażenie przy napięciu dotyku równym napięciu fazowemu niezależnie od parametrów sieci. Natomiast w sieciach okrętowych, które są sieciami trójprzewodowymi typu IT (rys. 15.4 b), wielkość prądu rażenia jest zależna od rezystancji izolacji sieci oraz pojemności przewodów sieci względem ziemi (ka-dłuba).



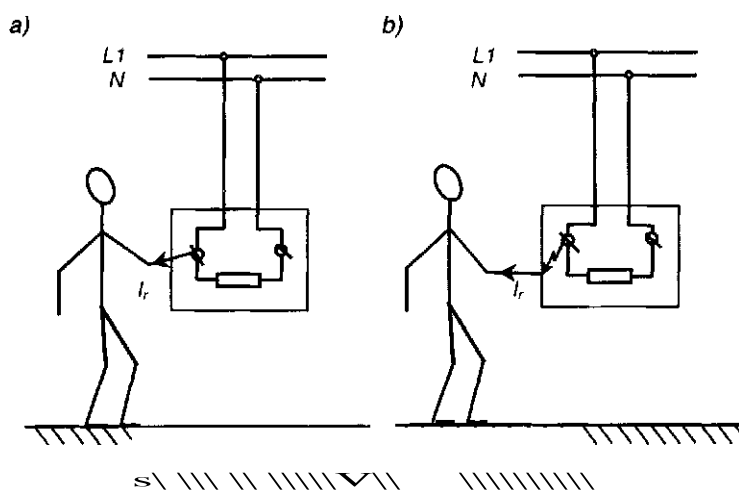
Rys. 15.4. Droga prądu rażenia w sieciach TN (a) i IT (b)

Szczególne zagrożenie powoduje użytkowanie odbiorników i przewodów ręcznych, zasilanych napięciem przekraczającym napięcie bezpieczne. Dotyczy to zwłaszcza przypadków, gdy ich budowa i sposób użytkowania mogą doprowadzić do uszkodzenia izolacji uchwytu ręcznego i znalezienia się pod niebezpiecznym napięciem dotykowym. W wyniku skurczu mięśni samouwolnienie się osoby trzymającej to urządzenie lub narzędzie jest praktycznie niemożliwe.

Najczęstszą przyczyną porażień jest właśnie używanie uszkodzonych lub wadliwie zbudowanych narzędzi ręcznych takich jak wiertarki, lampy przenośne itp. Źródłami zagrożenia są także niesprawne przewody łączeniowe, rozgałęźniki, wtyczki do odbiorników, gniazda wtyczkowe, nie osłonięte zaciski, odizolowane końcówki przewodów.

Przypadki porażenia można podzielić na:

- 1) **rażenie bezpośrednie** - zetknięcie się człowieka z częścią obwodu elektrycznego (rys.15.5 a), na której występuje napięcie robocze w normalnych warunkach pracy;
- 2) **rażenie pośrednie** - zetknięcie się człowieka z częścią urządzenia (rys.15.5 b), która znalazła się pod napięciem na skutek np. uszkodzenia izolacji.



Rys. 15.5, Przypadki rażenia bezpośredniego (a) i pośredniego (b)

Skutki porażenia prądem są tym groźniejsze, im większą powierzchnią ciała styka się człowiek z urządzeniem elektrycznym znajdującym się pod napięciem. Szczególnie niebezpieczne jest obejmowanie go dłonią, najmniej niebezpieczne natomiast jest dotykanie końcem palca (kciuka). W celu ograniczenia śmiertelnych wypadków, skutków porażień prądem elektrycznym i zmniej-



szania wpływu prądów zwarciovych na sieć stosuje się różnego rodzaju zabezpieczenia, mające za zadanie zmniejszenie wartości prądów zwarciovych, skrócenie czasu trwania oraz przypadkowego dostępu do elementów będących normalnie lub przypadkowo pod napięciem.

## 15.2. Środki ochrony przeciwporażeniowej

Niekontrolowany przepływ prądu przez ciało człowieka jest niebezpieczny dla życia, co omówiono w poprzednim podrozdziale. Obsługa urządzeń elektrycznych odbywa się przez osoby nie zawsze z pełnym przygotowaniem zawodowym, a czasami bez jakiegokolwiek wiedzy w tym zakresie (np. pasażerowie). Z tych względów rozwiązania techniczne i organizacyjne muszą zapewnić **maksymalną ochronę przed porażeniem prądem elektrycznym w każdych warunkach eksploatacyjnych**. Środki ochrony przeciwporażeniowej możemy podzielić na:

- środki ochrony przed dotykiem bezpośrednim,
- środki ochrony przed dotykiem pośrednim,
- środki ochrony przed dotykiem bezpośrednim i pośrednim.

## 15.3. Ochrona przed dotykiem bezpośrednim

Środki ochrony przed dotykiem bezpośrednim mają zapobiegać przed:

- a) zetknięciem się człowieka z przewodzącymi częściami obwodów elektrycznych znajdujących się pod napięciem;
- b) przerzutem napięcia na przedmioty lub części przewodzące, które normalnie nie są pod napięciem;
- c) szkodliwym oddziaływaniem na otoczenie łuku elektrycznego lub iskrzących styków.

W celu spełnienia tych wymagań, stosuje się następujące środki techniczne:

- pokrycie izolacją roboczą części będących pod napięciem,
- zastosowanie obudów urządzeń elektrycznych zapobiegających przed dotykiem i przedostaniem się wody do urządzeń,
- zastosowanie ogrodzeń i poręczy w pomieszczeniach ruchu elektrycznego,
- umieszczanie urządzeń elektrycznych poza zasięgiem ręki.

Istotnym elementem podstawowej ochrony przed porażeniem prądem elektrycznym są **obudowy urządzeń elektrycznych**. Dlatego też należy je omówić dokładniej.

Wykonanie osłon maszyn i urządzeń elektrycznych zależy od wymaganego stopnia ochrony określa norma krajowa, zgodna z normami międzynarodowymi. Norma ta nie dotyczy transformatorów oraz urządzeń przeznaczonych do pracy w warunkach zagrożenia wybuchem lub o charakterze specjalnym.

Zgodnie z normą PN-63/E-08106 typy osłon oznacza się literami **IP** oraz dwoma cyframi, z których **pierwsza - od 0 do 6** - określa stopień ochrony przed dotknięciem części znajdujących się pod napięciem i części ruchomych oraz przed przedostaniem się do wnętrza obcych ciał stałych (tab. 15.2). **Druga cyfra - od 0 do 8** - określa stopień ochrony przed przedostaniem się do wnętrza wody (tab. 15.3).

Tablica 15.2.

Typy i charakterystyka osłon przed dotknięciem i przed przedostaniem się obcych ciał stałych

Typ osłony (pierwsza cyfra charaktery- zująca)	Opis stopnia ochrony	
	ochrona osób przed dotknięciem części będących pod napięciem i części ruchomych wewnątrz urządzenia	ochrona urządzeń przed przedostaniem się do wnętrza obcych ciał stałych
0	brak specjalnej osłony przed dotknięciem	brak specjalnej osłony przed przedostawaniem się ciał stałych
1	osłona chroni przed dotknięciem przypadkowym częścią ciała ludzkiego o większej powierzchni, np. ręką, ale nie przed dotknięciem umyślnym	osłona chroni przed przedostaniem się ciał stałych o średnicy większej niż 52,2 mm
2	osłona chroni przed dotknięciem palcem	osłona chroni przed przedostaniem się ciał stałych o średnicy większej niż 12,5 mm
3	osłona chroni przed dotknięciem za pomocą narzędzi, drutów i innych przedmiotów oraz przed przedostaniem się ciał stałych o średnicy większej niż 2,5 mm	
4	osłona chroni przed dotknięciem za pomocą narzędzi, drutów i innych przedmiotów oraz przed przedostaniem się ciał stałych o średnicy większej niż 1 mm	
5	osłona zapewnia całkowitą ochronę przed dotknięciem	osłona chroni przed przedostaniem się pyłu w ilości, która mogłaby spowodować zakłócenia w działaniu urządzenia
6	osłona zapewnia całkowitą ochronę przed dotknięciem	osłona zapewnia całkowitą ochronę przed przedostaniem się pyłu

Typy i charakterystyka osłon przed przedostaniem się wody

Typ osłony (druga cyfra charakteryzująca)	Opis stopnia ochrony przed przedostawaniem się wody do wnętrza urządzenia
0	brak specjalnej osłony przed przedostawaniem się wody
1	osłona chroni przed przedostaniem się wody spadającej pionowo kroplami
2	osłona chroni przed przedostaniem się wody spadającej pionowo kroplami na urządzenie odchylone o kąt $0 \pm 15^\circ$ od pionu
3	osłona chroni przed przedostaniem się wody deszczowej padającej pod kątem $0 \pm 60^\circ$ od pionu
4	osłona chroni przed przedostawaniem się wody podczas oblewania nią urządzenia ze wszystkich stron w warunkach badań określonych przez normę
5	osłona chroni przed przedostawaniem się wody podczas oblewania urządzenia strumieniem wody w warunkach badania określonych przez normę
6	osłona chroni przed przedostawaniem się wody podczas oblewania urządzenia falą wody w warunkach badań określonych przez normę
7	osłona chroni przed przedostawaniem się wody podczas zanurzenia urządzenia w wodzie na głębokość 1 m
8	osłona chroni przed przedostawaniem się wody podczas zanurzenia urządzenia w wodzie na głębokość ustaloną w umowie między zamawiającym i dostawcą

Najczęściej spotykane typy osłony w przemyśle elektrotechnicznym pokazano w tabeli 15.4.

Tabela 15.4

Najczęściej spotykane typy osłon w przemyśle elektrotechnicznym

Stopień ochrony przed dotknięciem	Stopień ochrony przed przedostaniem się wody								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	IP00	IP01	–	–	–	–	–	–	–
1	IP10	IP11	IP12	IP13	–	–	–	–	–
2	IP20	IP21	IP22	IP23	–	–	–	–	–
3	IP30	IP31	IP32	IP33	IP34	–	–	–	–
4	IP40	IP41	IP42	IP43	IP44	–	–	–	–
5	IP50	–	–	–	IP54	IP55	IP56	IP57	IP58
6	IP60	–	–	–	–	IP65	IP66	IP67	IP68

W przemyśle okrętowym i żegludze stosuje się w praktyce znacznie mniej typów obudów. Według PRS na statkach należy stosować obudowy o następujących stopniach ochrony:

- pomieszczenia suche mieszkalne i kontrolno-sterownicze **IP20**
- pomieszczenia na mostku, pomieszczenia silników i kotłów, maszynownie chłodnicze, magazynki ogólnego przeznaczenia, pentry, pomieszczenia prowiantowe **IP22**
- łazienki i prysznice, pomieszczenia silników i kotłów poniżej podłogi **IP34**
- pomieszczenia pomp balastowych, chłodnie, kuchnie i pralnie **IP44**
- tunele wałów lub rurociągów w dnie podwójnym, ładownie dla drobnicy **IP55**
- pokłady otwarte **IP56**

## 15.4. Ochrona przed dotykiem pośrednim

Ochrona przed dotykiem pośrednim jest realizowana przez:

- zastosowanie samoczynnego szybkiego wyłączenia zasilania w tym:
  - wyłączenie przez zabezpieczenia nadmiarowo-prądowe (zerowanie),
  - wyłączenie przez wyłączniki ochronne różnicowoprądowe (O),
- stosowanie urządzeń II klasy ochronności (O),
- izolacja stanowiska (O),
- separacja elektryczna(O),
- kontrola stanu izolacji (O),

*(uwaga -wymieniono tylko najważniejsze i najczęściej spotykane środki ochrony przeciwporażeniowej; środki ochrony stosowane na statkach zostały oznaczone literą O).*

### 15.4.1. Samoczynne szybkie wyłączenie przez zabezpieczenia nadmiarowo-prądowe (zerowanie)

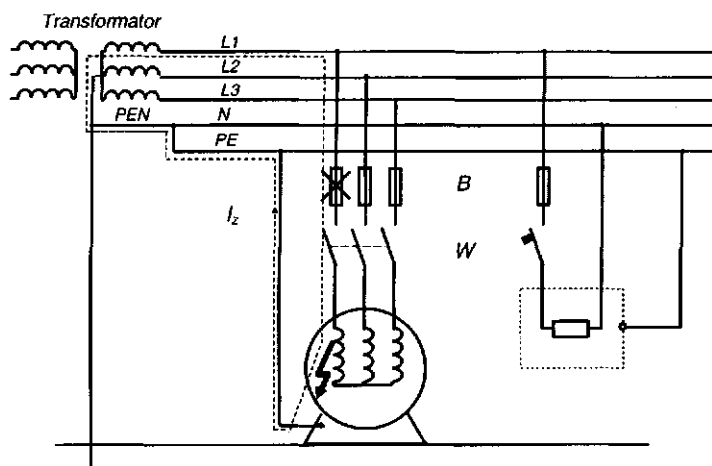
*Ten typ ochrony stosuje się tylko w sieciach cztero- i pięcioprzewodowych typu TN.*

Samoczynne szybkie wyłączenie przez zabezpieczenia nadmiarowo-prądowe (nazywane potocznie **zerowaniem**) stosuje się w celu zabezpieczenia człowieka przed możliwością pojawienia się napięcia na obudowie (przewodzącej) urządzenia lub maszyny. Polega na połączeniu obudowy z przewodem ochronnym *PE* i wykorzystaniu do celów ochrony przeciwporażeniowej zabezpieczeń zwarciovych urządzenia. Prąd zwarcia (gdą nastąpi uszkodzenie izolacji jednej z faz do obudowy) ma spowodować szybkie (dla sieci o napięciu roboczym 380/220 V w czasie krótszym od 0,4 s) zadziałanie zabezpieczeń zwarciovych, tj. przepalenie bezpiecznika/? lub wyłączenie wyłącznika *W*.

Wymagania dotyczące samoczynnego, szybkiego odłączenia uważa się za spełnione (tzn. zerowanie jest skuteczne), gdy prąd zwarcia  $I_z$  jest co najmniej równy prądowi szybkiego wyłączenia  $I_{sw}$  (zapewniającego czas zadziałania zabezpieczenia w sieciach nie większy od 0,4 s):

$$I_z \geq I_{sw} \quad (15.2)$$

Wartość prądu  $I_{sw}$  określa się na podstawie charakterystyk czasowo-prądowych zastosowanego w badanym obwodzie zabezpieczenia.



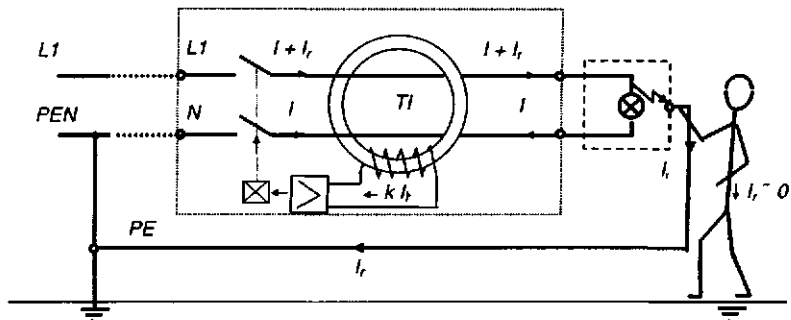
Rys. 15.6. Zasada działania zerowania

### 15.4.2. Wyłączniki różnicowoprądowe

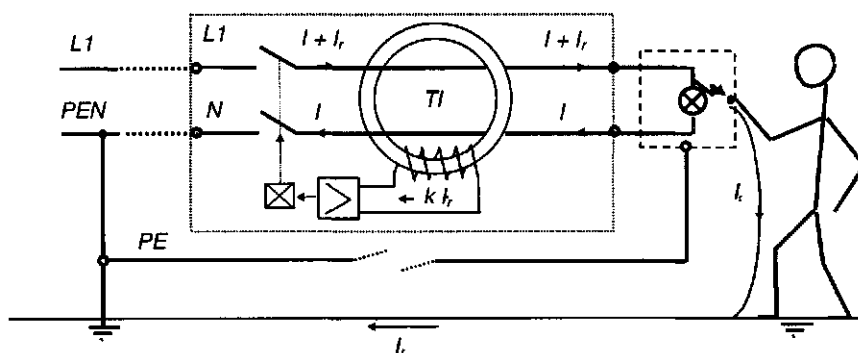
Wyłącznik różnicowoprądowy przerywa obwód zasilania, gdy za wyłącznikiem prąd upływu  $I_r$  osiągnie wartość  $I_{\Delta n}$  określoną przez producenta (10, 30, 300 lub 500 mA). Dla ochrony przeciwporażeniowej ludzi stosuje się wartości  $I_{\Delta n} = 10$  lub 30 mA, przy czasie zadziałania  $t = 0,01$  s. Tak krótki czas zadziałania ogranicza skutki działania prądu na organizm człowieka. Wyłączniki różnicowoprądowe (tzw. niskoczułe) o prądach wyzwalających 300 i 500 mA są stosowane jako zabezpieczenie przed prądami upływnościowymi doziemnymi, które mogą być przyczyną pożarów.

Wyłączniki różnicowoprądowe jednofazowy i trójfazowy działają na tej samej zasadzie analizy sumarycznej wartości prądu zasilania odbiornika. Przy uszkodzeniu izolacji za wyłącznikiem (rys. 15.7), prąd upływu  $I_r$  indukuje sygnał  $k \cdot I_r$  na zaciskach uzwojenia wtórnego transformatora toroidalnego  $\Sigma$ . Sygnał ten, po wzmocnieniu przez wzmacniacz elektroniczny, wyzwala wyłącznik odłączając zasilanie uszkodzonego obwodu.

Sposób działania wyłącznika zapewnia ochronę człowieka nawet przy przerwaniu przewodu ochronnego i przepływie prądu rażenia  $I_f$  przez człowieka i ziemię (rys. 15.8), jeżeli prąd rażenia osiągnie wartość co najmniej  $I_{\Delta n}$ . Produkowane współcześnie wyłączniki różnicowoprądowe działają na ogół już przy wartościach prądu rażenia niższych od  $I_{\Delta n}$  (50 - 80%  $I_{\Delta n}$ ).

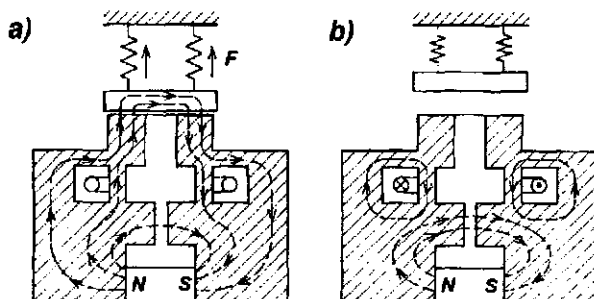


Rys. 15.7. Zasada działania wyłącznika ochronnego różnicowoprądowego



Rys. 15.8. Działanie wyłącznika różnicowoprądowego przy przerwanym przewodzie ochronnym

W ostatnim czasie rozpowszechniły się konstrukcje bardzo czułych wyłączników różnicowoprądowych o działaniu bezpośrednim (bez wzmacniacza elektronicznego) z przekaźnikiem spolaryzowanym (rys. 15.9). W warunkach pracy normalnej zwora przekaźnika jest przytrzymywana przez magnes trwały w pozycji umożliwiającej załączenie wyłącznika. Przy przepływie prądu różnicowego indukowany przez niego strumień magnetyczny nakłada się na strumień magnetyczny magnesu zniekształcając jego drogę, co prowadzi do odpadnięcia zwory wyłącznika.

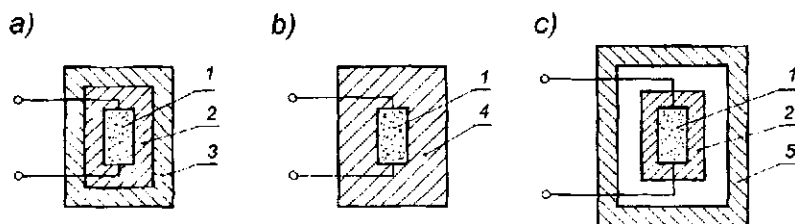


Rys. 15.9. Wyzwalacz spolaryzowany wyłącznika różnicowoprądowego: a) w warunkach pracy normalnej; b) przy występowaniu prądu różnicowego

### 15.4.3. Urządzenia wykonane w II klasie ochronności

Urządzenia wykonane w II klasie ochronności (nazywane też urządzeniami z podwójną lub wzmocnioną izolacją) są oznaczane na tabliczkach znamionowych symbolem **ICUI**. Mogą one być użytkowane we wszystkich układach sieci, chyba że normy szczegółowe stanowią inaczej. Działanie ochronne tych urządzeń polega na takim wykonaniu izolacji części czynnych, aby ich uszkodzenie zagrażające porażeniem było mało prawdopodobne.

Zrealizowane jest to przez zastosowanie podwójnych lub wzmocnionych warstw izolacyjnych oraz stosowaniu obudów izolacyjnych (rys. 15.10).



Rys. 15.10. Przykłady izolacji urządzeń II klasy ochronności:  
1 - części czynne, 2 - izolacja podstawowa, 3 - izolacja dodatkowa,  
4 - izolacja wzmocniona, 5 - obudowa izolacyjna

W drugiej klasie ochronności wykonuje się głównie drobny sprzęt gospodarstwa domowego oraz elektronarzędzia.



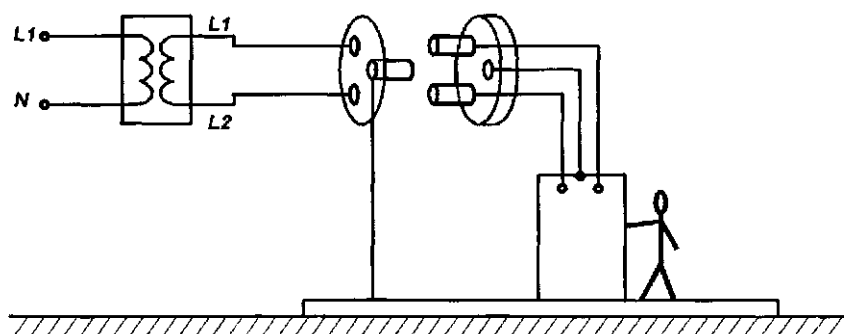
#### 15.4.4. Izolowanie stanowiska

Izolowanie stanowiska jest stosowane w pomieszczeniach suchych, przy prądzie przemiennym i stałym. Może być stosowana jako samodzielna ochrona lub łącznie z innymi środkami ochrony. Na statkach stosuje się **chodniki dielektryczne** przed i za *RG*, przed rozdzielnią chłodni oraz w warsztacie elektrycznym.

Izolacja stanowiska ma na celu niedopuszczenie do przepływu prądu przez ciało człowieka przy dotknięciu urządzeń elektrycznych, w których nastąpił przerzut napięcia na części przewodzące (obudowy), nie należące do obwodu elektrycznego. W tym celu izolacja stanowiska musi być tak wykonana, aby obsługa była odizolowana od części metalowych pokładu.

#### 15.4.5. Separacja odbiornika

Separacja odbiornika polega na oddzieleniu galwanicznym odbiornika od sieci za pomocą transformatora separacyjnego, jak pokazano na rys. 15.11. Napięcie zasilania obwodu separowanego nie może przekraczać 500 V. Transformatory separacyjne są tak wykonywane, że wykluczona jest możliwość zwarcia między jego uzwojeniem pierwotnym i wtórnym (uzwojenia umieszczone są na różnych kolumnach rdzenia, lub w przypadku umieszczenia na jednej kolumnie skutecznie rozdzielone przegrodą izolacyjną, zaś rdzeń jest zerowany lub uziemiony). Dzięki transformatorowi odbiornik wraz z przewodami zasilany jest z obwodu o małym prądzie upływu (duża rezystancja izolacji krótkiego obwodu) i pojemności względem ziemi. Dotknięcie w separowanym obwodzie jednego przewodu pod napięciem spowoduje przepływ bardzo małego, niegroźnego prądu rażenia.



Rys. 15.11. Zastosowanie transformatora separacyjnego

Z transformatora separacyjnego nie powinno się w zasadzie zasilać więcej niż jeden odbiornik, a obwód zasilania powinien być jak najkrótszy.

### 15.4.6. Kontrola stanu izolacji

W sieciach trójprzewodowych typu IT, jak już wspomniano w rozdziale 15.1, prąd rażenia przy dotknięciu jednej fazy jest zależny m.in. od rezystancji izolacji pozostałych faz. Systematyczna kontrola rezystancji izolacji układu elektroenergetycznego ma również duże znaczenie profilaktyczne. Pogorszenie rezystancji izolacji prawie zawsze doprowadza do zwarcia doziemnego, co w konsekwencji powoduje, że kadłub uzyska potencjał zwartej fazy, a tym samym napięcie dotyku osiągnie wartość napięcia międzyfazowego i znacznie zwiększy niebezpieczeństwo porażenia człowieka. Dlatego eksploatacja układu, którego rezystancja izolacji jest mniejsza od dopuszczalnej, jest niedozwolona.

Jako pojęcie, **stan izolacji**  $R_{iz}$  jest wartością wypadkową rezystancji wszystkich trzech faz względem ziemi lub kadłuba statku:

$$R_{f1} \cdot R_{f2} + R_{f2} \cdot R_{f3} + R_{f3} \cdot R_{f1} \quad R_{iz} = \frac{R_{f1} \cdot R_{f2} \cdot R_{f3}}{R_{f1} + R_{f2} + R_{f3}}$$

Zadaniem urządzeń kontroli stanu izolacji jest pomiar rezystancji izolacji. W lądowych sieciach IT (np. kopalnianych) urządzenia kontroli stanu izolacji powodują wyłączenia zagrożonych odcinków sieci.

W sieciach okrętowych, zgodnie z przepisami PRS, kontroli podlega rezystancja izolacji faz względem kadłuba, ale **urządzenia kontrolujące nie wyłączają zasilania, a włączają tylko układy alarmowe.**

Przepisy PRS wyróżniają dwa rodzaje sprawdzania stanu izolacji:

- kontrolę okresową,
- kontrole ciągłą.

**Kontrola okresowa** przeprowadzana jest w czasie prób zdawczych po zakończeniu budowy, w czasie przeglądów okresowych lub po zakończeniu remontu. Kontrolę wykonuje się za pomocą megaomomierzy indukcyjnych. W czasie badania każdy obwód może być podzielony na dowolną liczbę odcinków, używając istniejących w obwodzie łączników lub przez wyjęcie bezpieczników albo odłączenie odbiorników. Rezystancja izolacji mierzonego odcinka nie powinna być mniejsza od podanych w tabeli 1 5.5.

Najmniejsze dopuszczalne rezystancje izolacji w czasie kontroli okresowej

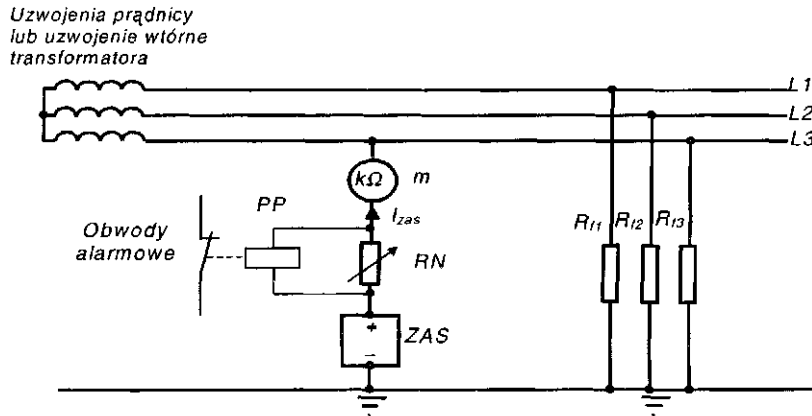
Lp.	Przeznaczenie obwodu	Minimalna rezystancja izolacji [MΩ] dla sieci o napięciu znamionowym		
		do 125 V	od 125 V do 500 V	powyżej 500 V
1	Zasilanie odbiorników oświetleniowych	0,3	1,0	–
2	Zasilanie odbiorników siłowych	–	1,0	2 kΩ na każdy 1 V napięcia znamionowego
3	Obwody układów łączności (jeżeli nie ustalono innych wymagań)	0,3	1,0	–

Na polskich statkach do **kontroli ciągłej stanu izolacji** jest najczęściej używany przekaźnik upływnościowy typu PU-2. Zasadę działania przekaźnika przedstawia rys. 15.12. Zasilacz stabilizowany napięcia stałego ( $U_{zas} = 48 \text{ V}$ ) jest włączony między kadłub statku a jedną z faz. Prąd stały z bieguna dodatniego zasilacza płynie przez przewody fazowe i rezystancje izolacji do kadłuba, do którego przyłączony jest biegun ujemny zasilacza (na pozostałe dwie fazy prąd stały dostaje się przez uzwojenia prądnicy lub transformatora). Przy założeniu, że rezystancje uzwojeń oraz linii są pomijalne w stosunku do rezystancji izolacji, rezystancja zastępcza obwodu jest równa stanowi izolacji  $R_{iz}$ , a prąd zasilacza  $I_{zas}$  jest zgodnie z prawem Ohma równy:

$$I_{zas} = \frac{U_{zas}}{R_{iz}} \quad (15.4)$$

Miliamperomierz w obwodzie pomiarowym, wyskalowany w kA, wskazuje aktualną wartość stanu izolacji.

Przekaźniki upływnościowe wyposażone są w układ alarmowy, który przy spadku wartości  $R_{iz}$  poniżej wartości krytycznej (zazwyczaj 30 kΩ dla sieci 3 x 380 V i 15 kΩ dla sieci 3 x 220 V) inicjuje alarm akustyczny i optyczny w siłowni. Alarm jest inicjowany przekaźnikami pomocniczymi, uruchamianymi spadkiem napięcia z rezystora nastawnego. Jeżeli stan izolacji ulegnie pogorszeniu, wzrośnie prąd płynący z zasilacza, a tym samym spadek napięcia na rezystorze  $R_N$  osiągnie wartość wy starczającą do uruchomienia przekaźników.



Rys. 15.12. Zasada działania przekąznika upływnościowego typu PU-1:  
ZAS - zasilacz 48 V, RN - rezystor nastawny, m -  
miernik stanu izolacji, PP — przekąznik pomocniczy

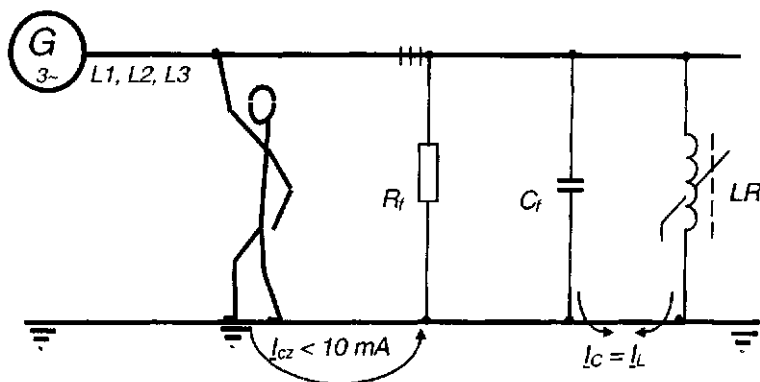
### 15.4.7. Kompensacja pojemnościowych prądów rażenia

Sieć okrętowa posiada, oprócz rezystancji izolacji, również pojemności faz względem kadłuba (C/), powodujące wzrost prądu rażenia  $I_{cz}$  powyżej wartości 10 mA już przy pojemności  $C/ > 0,1$  [iF, Ponieważ pojemność C/ sieci elektrycznej współczesnych statków morskich wynosi na ogół od 0,5 fiF do 3 (J.F, prąd rażenia człowieka przepływając przez pojemności fazowe osiąga wartości grożące porażeniem śmiertelnym, mimo zgodnego z przepisami stanu izolacji.

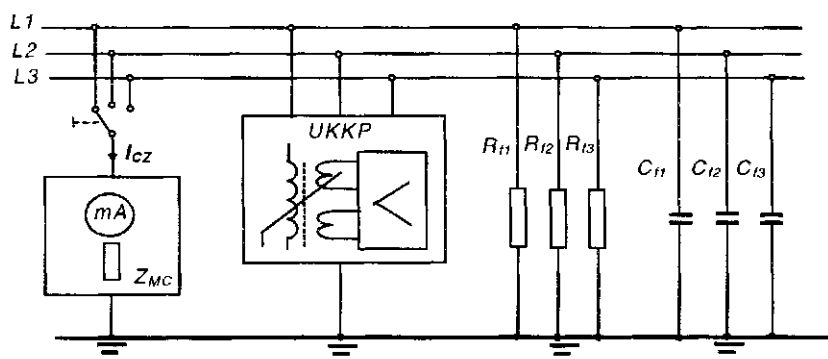
Ograniczenie wartości prądu rażenia do bezpiecznej wartości (tj. poniżej 10 mA) można osiągnąć przez kompensację prądu  $I_{cz}$  o charakterze pojemnościowym za pomocą indukcyjności rezonansowej (dla warunku rezonansu równoległego  $X_L = X_C$ ). Podczas rezonansu (tzn. przy kompensacji pojemności C/ sieci przez indukcyjność LR dławika) prąd rażenia  $I_{cz} < 10$  mA. Zasada kompensacji została pokazana na rys. 15.13.

Układ kompensacyjny skonstruowany w WSM w Szczecinie (rys. 15.14) został wyposażony dodatkowo w konwerter impedancji ujemnej, zmniejszający jeszcze bardziej prądy rażenia.

Ustawienia wartości regulowanej indukcyjności oraz nastawa konwertora są aktualizowane zależnie od próbkowanej wartości prądu rażenia w modelowej impedancji ciała człowieka. Urządzenia zostały skonstruowane oraz wdrożone we flocie polskiej.



Rys. 15.13. Zasada kompensacji prądów pojemnościowych:  
LR - dławik regulowany



Rys. 15.14. Urządzenie do kompensacji prądów pojemnościowych typu UKKP-2:  $Z_{Mc}$  - modelowa impedancja człowieka, UKKP - dławik i konwertor

## 15.5. Ochrona przed dotykiem bezpośrednim i pośrednim

W grupie tej występuje tylko jeden środek ochrony przeciwporażeniowej. Jest nim **obniżenie napięcia roboczego poniżej wartości napięcia bezpiecznego**. Obniżone napięcie uzyskuje się z transformatorów bezpieczeństwa, wykonywanych według podobnych wymagań jak transformatory separacyjne.

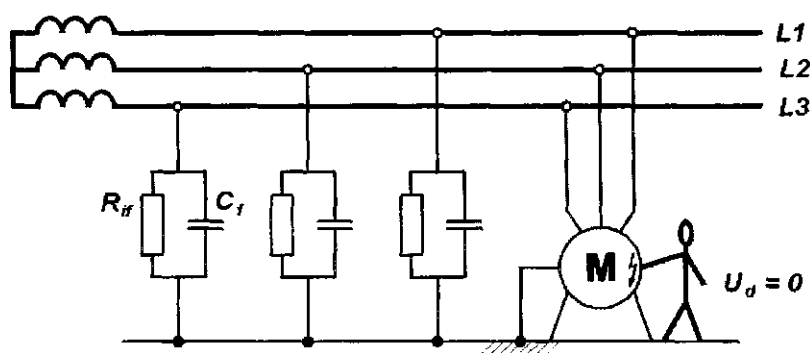
W praktyce spotyka się napięcie bezpieczne używane głównie do ręcznych lamp oświetleniowych (tzw. kabłówek) o napięciu 24 V. Na statkach w miejscach szczególnie niebezpiecznych stosuje się obniżenie napięcia do 12 V. Gniazda wtyczkowe z obniżonym napięciem zasilane z transformatorów bezpieczeństwa są zainstalowane w miejscach i pomieszczeniach o zwiększonej wil-

gotności oraz szczególnie wilgotnych i są przeznaczone do zasilania odbiorników bez izolacji podwójnej lub wzmocnionej albo nieseparowanych. Konstrukcja tych gniazd wtyczkowych i wtyczek jest inna niż stosowanych w sieci ogólnej. W miejscach o szczególnym zagrożeniu porażeniowym stosuje się lampy i elektronarzędzia z zasilaczami w postaci akumulatorów (o pojemności kilku Ah) lub ogniw galwanicznych.

## 15.6. Inne środki zapobiegania porażeniom elektrycznym na statku

### 15.6.1. Uziemienie ochronne

Wszystkie metalowe obudowy urządzeń elektrycznych pracujące na napięciu większym od bezpiecznego powinny być uziemione oddzielnym przewodem do kadłuba statku (rys. 15.15).



Rys. 15.15. Uziemienie ochronne

W przypadku uszkodzenia izolacji wewnątrz urządzenia, przewód uziemiający o małej rezystancji spowoduje wyrównanie potencjału elektrycznego pomiędzy obudową urządzenia a podłożem urządzenia. Napięcie dotyku będzie wówczas  $U < i \sim 0$ , a jednocześnie zadziałają alarmy urządzenia kontroli stanu izolacji. Zgodnie z przepisami PRS, urządzenia elektryczne mocowane na stałe należy uziemiać za pomocą zewnętrznych przewodów uziemiających lub żyły uziemiającej w kablu zasilającym. Można nie stosować uziemienia, jeżeli zamocowanie urządzenia zapewnia trwały elektryczny styk między obudową urządzenia i kadłubem statku we wszystkich warunkach eksploatacji (np. przez przyspawanie obudowy). Przekrój przewodu uziemiającego zewnętrznego powinien być nie mniejszy niż połowa przekroju żyły kabla zasilającego. W przy-

padku stosowania do uziemienia żyły kabla zasilającego, jej przekrój powinien być równy przekrojowi żył zasilających (dla kabli o przekroju do 16 mm<sup>2</sup>) lub co najmniej połowę przekroju, lecz nie mniej niż 16 mm<sup>2</sup> (dla kabli o przekroju większym od 16 mm<sup>2</sup>). Zaciski uziemiające urządzeń należy wykonywać śrubami o średnicy co najmniej 6 mm.

### 15.6.2. Indywidualne środki ochrony

W czasie eksploatacji istnieje czasami konieczność wykonania określonych czynności naprawy bez możliwości wyłączenia urządzenia. **Sytuacji takiej należy zdecydowanie unikać.** Jednak, gdy sytuacja zmusza załogę do wykonania określonej czynności pod napięciem, to muszą być zastosowane szczególne środki ostrożności, a pracę wykonywać:

- a) z zastosowaniem indywidualnych środków ochrony jak:
  - rękawice izolacyjne,
  - kalosze dielektryczne,
  - chodniki dielektryczne,
  - narzędzia izolowane;
- b) w zespole co najmniej dwuosobowym (jedna osoba - asekurowująca) posiadającym odpowiednie uprawnienia (np. świadectwo SEP, dyplom elektryka).

**Właściwa organizacja pracy** polega na przestrzeganiu następujących zaleceń:

- a) prace naprawcze, konserwacyjne lub przeglądowe wykonywać przy **wyłączonym obwodzie**, wyjętych bezpiecznikach w obwodach głównych oraz wyłączonych obwodach sterujących (które mogą być zasilane z innych obwodów);
- b) powiesić tablicę ostrzegawczą zabraniającą załączania;
- c) przed przystąpieniem do pracy **sprawdzić czy napięcie zostało wyłączone.**