

## CZĘŚĆ II.

# Własności obwodu elektrycznego.

### ROZDZIAŁ V.

## Oporność omowa i przewodność ciał.

1. **Określenie zasadnicze.** Wiemy z doświadczenia, że wszystkie przewodniki, po których przepływa prąd, ogrzewają się. Jeżeli będziemy mieli na względzie przewodniki jednorodne na całej rozważanej długości, to wywiązywanie się ciepła wyjaśniamy sobie własnością przewodników, którą przyjęto nazywać opornością lub oporem omowym i uważać za wprost proporcjonalną do ilości ciepła, wywiązującego się w jednostce czasu. Wiadomo też z doświadczenia, że ilość wywiązującego się w przewodniku ciepła jest proporcjonalna do drugiej potęgi prądu. Te zależności wyraża prawo Joule'a.

Mówimy zwykle, że ciepło powstaje skutkiem pracy prądu; jeżeli więc moc prądu, wytwarzającą ciepło, oznaczmy przez  $P$ , to będzie ona wprost proporcjonalna do  $I^2$  i do  $R$ . Piszemy zatem:

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

Wzór ten określa ściśle pojęcie oporu omowego przewodnika —  $R$ .

Bezwzględna jednostkę elektromagnetyczną oporu wyprowadzimy z założenia, że prąd w przewodniku posiada natężenie bezwzględnej jednostki elektromagnetycznej, a moc jego, wytwarzająca ciepło Joule'a, wynosi jeden erg na sekundę.

Praktyczna zaś jednostka —  $\text{om}^1$ ) jest to oporność takiego przewo-

---

<sup>1)</sup> Om oznacza się zwykle przez dużą literę grecką omega:  $\Omega$ . Określenie oma, podane tutaj, jest teoretyczne, określenie praktyczne będzie następujące: opór jednego oma ma słup rtęci w temperaturze  $0^\circ\text{C}$ , którego długość przy jednostajnym przekroju wynosi 106,300 cm. a masa 14,4521 gr. W tych warunkach przekrój mało się różni od  $1 \text{ mm}^2$ .

dnika, w którym, przy prądzie jednego ampera, moc, wytwarzająca ciepło, wynosi jeden wat.

Doświadczeniem stwierdzono, że wielkość oporności jest wprost proporcjonalna do długości przewodnika i odwrotnie proporcjonalna do przekroju, — nadto oporność zależy od własności chemicznych i fizycznych przewodnika.

Na oporność przewodników wpływają rozmaite czynniki zewnętrzne, np. selen jest bardzo wrażliwy na promienie świetlne. Szczególnie pod wpływem promieni żółto-zielonych oporność selenu zmniejsza się znacznie. Po usunięciu tego wpływu wielkość oporności wraca do poprzedniej wartości, odbywa się to jednak powoli. Szczególnie wrażliwy na promienie świetlne jest taki selen, który był poprzednio utrzymywany przez czas długi w temperaturze nieco niższej od temperatury topnienia (220°).

Oporność bismutu zmienia się pod wpływem pola magnetycznego.

Przewodnością nazywamy wielkość odwrotną względem oporności. Przewodność oznaczamy przez  $G$

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

Jednostką przewodności będzie przewodność takiego drutu, którego oporność równa się jednemu omowi. Taką jednostkę przewodności nazywamy mo lub simens

**2. Oporność właściwa i przewodność właściwa.** Zwykle oporność przewodników wyrażamy wzorem następującym:

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

gdzie  $l$  — długość przewodnika (najczęściej w metrach),  $s$  — przekrój przewodnika (najczęściej w milimetrach kwadratowych),  $\rho$  — oporność właściwa zależna od chemicznych i fizycznych własności przewodnika i zewnętrznych czynników.

Przewodność przewodników wyrażamy zazwyczaj wzorem:

$$G = \gamma \cdot \frac{s}{l}.$$

gdzie  $l$  — długość przewodnika,  $s$  — przekrój, a  $\gamma$  przewodność właściwa.

**3. Zależność oporności właściwej od temperatury.** W praktyce elektrotechnicznej możemy posługiwać się wzorem przybliżonym:

$$\rho_t = \rho_{15^\circ} [1 + \alpha (t - 15)].$$

$\rho_t$  — oporność właściwa przy temperaturze  $t$ ;  $\rho_{15^\circ}$  — oporność właściwa przy temperaturze 15°,  $\alpha$  — współczynnik cieplny zmiany oporności elektrycznej przy temp. 15° C. Często wypada obliczać przyrost temperatury przewodników miedzianych zależnie od wzrostu oporu. Wtedy lepiej

stosować następujące rozumowanie: Oznaczmy przez  $R'$  opór przewodnika przy temperaturze  $t_1$ , przez  $R''$  — opór przewodnika przy temperaturze  $t_2$ ,  $R_0$  — opór przy temperaturze  $0^\circ$ , wtedy, według wzoru powyższego przy początkowej tem.  $0^\circ$ .

$$R' = R_0 (1 + \alpha_0 t_1)$$

$$R'' = R_0 (1 + \alpha_0 t_2)$$

stąd:

$$R'' - R' = R_0 \alpha_0 (t_2 - t_1),$$

a

$$t_2 - t_1 = \frac{R'' - R'}{R_0 \cdot \alpha_0}$$

Zwykle nieznamy wartości  $R_0$ , więc wprowadźmy na to miejsce  $R'$  z pierwszego równania:

$$R_0 = \frac{R'}{1 + \alpha_0 t_1},$$

wtedy:

$$t_2 - t_1 = \frac{R'' - R'}{R'} \cdot \frac{1 + \alpha_0 t_1}{\alpha_0},$$

Jeżeli

$$\frac{R'' - R'}{R'} = p\% \text{ i } \frac{1 + \alpha_0 t_1}{\alpha_0} = k, \text{ to:}$$

$$t_2 - t_1 = \frac{p}{100} \cdot k,$$

Dla miedzi używanej do uzwojenia maszyn elektrycznych współczynnik  $k$  przy różnych temperaturach początkowych  $t_1$  w przybliżeniu wynosi<sup>1)</sup>:

$$k = 235 + t_1.$$

Przykład: Uzwojenie transformatora na zimno miało opór — 3,26  $\Omega$ , a na gorąco: 4,03  $\Omega$ . Temperatura początkowa wynosiła  $14^\circ$ .

Według powyższych wzorów:

$$p = \frac{4,03 - 3,26}{3,26} \cdot 100 = 24\%.$$

$$k = 235 + 14 = 249.$$

$$t_2 - t_1 = \frac{24}{100} \cdot 249 = 59,75.$$

#### 4. Ważniejsze dane liczbowe dotyczące oporności właściwej.

Oporność właściwą i współczynnik cieplny podaję według F. E. Emde<sup>2)</sup>. Dla glinu, cynku, drutu żelaznego i miedzi wartości  $\rho$  i  $\alpha$  podane są

<sup>1)</sup> Tu  $\alpha$ , przyjęto, = 0,00427. W Ameryce przyjmują;  $k = 238,1 + t_1$ .

<sup>2)</sup> Patrz Deutscher Kalender für Elektrotechniker dr. Ing. G. Dettmer, München 1925.

przy 20°, dla innych metali przy 15°. Dla innej temperatury  $\rho$  — oblicza się według wzoru:

$$\rho_t = \rho_{15^\circ} [1 + \alpha (t - 15^\circ)] . -$$

$\rho$  — obliczone na  $1_m : 1_{mm}^2$ ,

M A T E R J A Ł	$\rho$	$\alpha \times 1000$
Bismut prasowany . . . . .	1,1 — 1,4	3,5
Cyna . . . . .	0,11 — 0,14	4,5
Cynk . . . . .	0 0625	3,9
Glin walcowany . . . . .	0,031	3,7
Miedziany drut przewodnikowy . .	0,01784	3,81
Nikiel . . . . .	0,10	4,2
Ółów prasowany . . . . .	0,20	3,7
Platyna . . . . .	0,094	2,35
Rtęć . . . . .	0,9532	0,873
Srebro twarde . . . . .	0,0175	} 3,6
„ miękkie . . . . .	0,0158	
Złoto . . . . .	0,022	3,50
Żelazny drut . . . . .	0,143	4,7
Mosiądz (30% Zn.) . . . . .	0,085 — 0,065	1,2 — 2,0
Manganin (stop: Cu — Ni — Mn) . .	0,42 — 0,43	— 0,003 do 0,008
Nikelin (stop Cu — Ni) . . . . .	0,41 — 0,43	0,019 do 0,021
Krupin (stop Fe — Ni) . . . . .	0,85 — 0,86	0,7
Grafit i węgiel z retort <sup>1)</sup> . . . . .	13 — 10)	— 0,8 do — 0,2

Ze wzrostem temperatury oporność prawie wszystkich metali zwiększa się. Oporność zaś węgla przeważnie zmniejsza się, więc  $\alpha$  jest tu ujemne; znane są jednak odmiany węgla, posiadające własności metaliczne, t. j.  $\alpha$  dodatnie.

Zmiana oporności stopów pod wpływem temperatury jest wogóle znacznie mniejsza, niż zmiana oporności metali czystych. Gdy dla metali czystych przyrost oporu na jeden stopień skali Celsjusza wynosi przeważnie około 0,004, to natomiast niektóre stopy mają współczynnik tysiąc razy mniejszy.

W technice stosowane są zarówno przewodniki o dużym, jak i o małym  $\alpha$ . Gdy chodzi o to, aby przy zwiększającym się prądzie, a więc i wzrastającej temperaturze przewodnika, oporność wzrastała to należy stosować np. miedź lub żelazo. Mając na względzie szersze granice tem-

<sup>1)</sup> Diament i zwykły węgiel drzewny mają nadzwyczaj wielką oporność właściwą.

peratury, należy zaznaczyć, że np. dla żelaza przy wzroście temperatury od 0° do 800° oporność wzrasta więcej niż proporcjonalnie do temperatury, a krzywa, wyrażająca tę zależność, ma kształt zbliżony do paraboli.

Przy 800° oporność właściwa żelaza jest mniej więcej pięciokrotna w porównaniu do oporności właściwej przy 0°.

Przewodniki o dużym współczynniku cieplnym oporu mają np. zastosowanie przy mierzeniu temperatury sposobem elektrycznym.

Gdy wszakże chodzi o stałość oporu przewodników w rozmaitych okolicznościach, najwłaściwsze są stopy (np. manganin t. j. stop miedzi z manganem i niklem), których opór przy znacznych nawet wahanach temperatury zmienia się bardzo mało.

Oporności właściwe roztworów wskazuje tablica następna <sup>1)</sup>, w omach na długości 1 cm i przekrój 1 cm<sup>2</sup> przy 18° C.; współczynnik  $\alpha$  na 1° C. wynosi dla wszystkich wymienionych tu roztworów około 2‰ i jest ujemny, tak, że przy ogrzewaniu oporność właściwa roztworów zmniejsza się.

Stężenie wpływa na oporność roztworów w ten sposób, że roztwory znacznie rozcieńczone i silnie stężone mają opór duży; przy pewnym średnim stężeniu opór roztworów jest zazwyczaj najmniejszy <sup>2)</sup>.

R O Z T W Ó R :	Procentowa zawartość ciała rozpuszczonego w wodzie:						
	5	10	15	25	30	50	80
Kwasu siarkowego H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . . . . .	4,78	2,55	1,84	1,39	1,35	1,85	9,02
„ azotowego HNO <sub>3</sub> . . . . .	3,87	2,17	1,63	1,30	1,27	1,58	3,75
„ solnego HCl . . . . .	2,53	1,59	1,34	1,38	1,51	—	—
Wodorotlenku potasu KHO . . . . .	5,82	3,17	2,35	1,85	1,84	—	—
Soli kuchennej NaCl . . . . .	14,92	8,27	6,10	4,67	—	—	—
Siarczanu miedzi CuSO <sub>4</sub> . . . . .	52,60	31,30	23,80	—	—	—	—
Siarczanu cynku ZnSO <sub>4</sub> . . . . .	52,60	31,30	21,80	20,85	22,74	—	—
Siarczanu magnezu MgSO <sub>4</sub> . . . . .	38,50	24,40	20,85	23,80	—	—	—

Prąd elektryczny przepływa również przez tak zwane ciała izolujące. Oporność tych ciał zależy w wysokim stopniu od napięcia prądu, przy którym wykonywane są pomiary, od temperatury i stopnia wilgotności otaczającego

<sup>1)</sup> Zacierpnięta z kalendarza Dettmara za rok 1925 i przeliczona z przewodności na oporność.

<sup>2)</sup> Patrz rozdział XX, § 3.

powietrza. Na podstawie pomiarów, przeprowadzonych w pracowni miejskiej w Monachjum <sup>1)</sup>, podaję tu kilka ważniejszych liczb w omach na 1 cm długości przy 1 cm<sup>2</sup> przekroju.

Materiał	Oporność właściwa	Napięcie w woltach na 1 mm grubości	Temperatura powietrza w stop. C.	Wilgotność względna powietrza w %
Szkło . . . . .	$8,2 \cdot 10^{12}$	405	19	48
" . . . . .	$6,6 \cdot 10^{12}$	650	17	70
Mika . . . . .	$2,3 \cdot 10^{13}$	4000	19	48
Kauczuk . . . . .	$1130 \cdot 10^{13}$	6600	17	80
" . . . . .	$800 \cdot 10^{13}$	10500	17	80
" . . . . .	$210 \cdot 10^{12}$	21000	17	80
Guma twarda (ebonit) . . .	$> 4200 \cdot 10^{12}$	540	19	48
" " . . . . .	$3600 \cdot 10^{12}$	910	17	70
Linoleum . . . . .	$1,3 \cdot 10^{12}$	286	16	70
" . . . . .	$1,0 \cdot 10^{13}$	572	16	70
Marmur . . . . .	$510 \cdot 10^6$	33,7	16	70
" . . . . .	$495 \cdot 10^6$	50,4	16	70
" . . . . .	$435 \cdot 10^6$	66,5	16	70
Łupek (szyfer) . . . . .	$0,78 \cdot 10^6$	40,0	16	70
Gлина (wypalona bez glazury) .	$13000 \cdot 10^6$	92	19	48
Fibra . . . . .	$53 \cdot 10^6$	371	19	48
Mikanit . . . . .	$6500 \cdot 10^{12}$	1250	19	48
Parafina . . . . .	$3900 \cdot 10^{12}$	435	17	70
" . . . . .	$240 \cdot 10^{12}$	2860	17	80

Wreszcie zaznaczyć jeszcze można, że oporność właściwa wody destylowanej wynosi od 0,3 do 7 milionów omów<sup>2)</sup>, na 1 cm długości, przy 1 cm<sup>2</sup> przekroju, smoły drzewnej  $1,7 \cdot 10^{15} \Omega$  przy 18° C., a ciężkiego oleju parafinowego  $8 \cdot 10^{12} \Omega$  — w tych samych warunkach.

Suche drzewo ma opór właściwy około kilkudziesięciu milionów omów na 1 cm i cm<sup>2</sup>.

W praktyce oceniamy zwykle wartość materiałów izolacyjnych nie podług oporności omowej, lecz według najmniejszego natężenia pola elektrycznego, które przebija izolator<sup>3)</sup>.

<sup>1)</sup> Patrz: Deutscher Kalender für Elektrotechniker von G. Dettmar 1925 r.

<sup>2)</sup> Opór wody rzecznej przy długości 1 cm i przekroju 1 cm<sup>2</sup> wynosi około 3000 omów według innych badań 10000 omów, wogóle jednak zależy oczywiście w znacznym stopniu od składu chemicznego.

<sup>3)</sup> Patrz Rozdział X.