ROZDZIAŁ V.

Obliczanie na gospodarność.

§ 26. Koszt przesyłania prądu.

Przy wyznaczaniu przekroju przewodów kierujemy się względami zarówno natury technicznej (spadek napięcia, nagrzewanie, wytrzymałość), jak i względami natury gospodarczej. Dotychczas obliczaliśmy przekroje tylko na spadek napięcia. W wielu przypadkach tak dalece zależy na osiągnięciu małych spadków napięcia, że obliczanie na gospodarność jest zgoła zbyteczne. Dotyczy to sieci oświetleniowych. Dla osiągnięcia równego światła decydujemy się dawać większe przekroje, niż wypadałoby to z rachunków gospodarczych. Ale już w sieciach silnikowych spadek napięcia odgrywa podrzędniejszą rolę. Wreszcie w torach zasilających, w których spadek napięcia może być wyrównany przez podniesienie napięcia w elektrowni, względy na spadek napięcia nie mają żadnego znaczenia, a decydują czynniki gospodarcze.

Przekrojem gospodarczo najkorzystniejszym nazywamy taki przekrój, przy którym koszt przesyłania prądu osiąga minimum. Przy większym przekroju wypadłyby za wielkie koszta oprocentowania kapitału, wyłożonego na instalację przewodów, przy mniejszym przekroju — za wielkie koszta wytwarzania energji, traconej w przewodach.

Obliczmy koszta przesyłania prądu. Zaczniemy od ustalenia kosztów zakładowych toru elektrycznego. Koszta te, które oznaczymy przez F_p, składają się z dwóch pozycyj: 1) proporcjonalnej do długości toru (l) i 2) niezależnej od długości. Do pierwszej pozycji należą przewody z przyborami wsporczemi i izolacyjnemi tudzież montaż, a do drugiej — zakończenia przewodów z obu stron i przyłączenia wraz z urządzeniami rozdzielczemi i pomiarowemi. Oznaczmy przez P wszystkie koszta pierwszej pozycji, obliczone na 1 m długości pojedyńczego przewodu, a przez C — sumę wszystkich kosztów drugiej pozycji, a otrzymamy równanie:

$$F_p = 2\,l\,P + C. \tag{a}$$

Koszta 1 m zainstalowanego przewodu P składają się również z dwóch członów: 1) proporcjonalnego do przekroju (s) i 2) niezależnego od przekroju. Koszta te wyrażają się wzorem:

$$P = a\,s + c, \qquad \text{(b)}$$

w którym a i c będą dla danej instalacji wielkościami stałemi, a wogóle będą zależały od rodzaju przewodu, od sposobu założenia i od cen rynkowych. Koszt miedzi, jako ściśle proporcjonalny do przekroju, będzie tkwił wyłącznie w spółczynniku a, natomiast koszt montażu, izolatorów, słupów, a w kablach — warstw izolacyjnych i pancernych, jako zależny tylko w niewielkim stopniu od przekroju, będzie zawarty głównie w spółczynniku c. Łącząc równanie (a) z (b) w jedno, otrzymamy:

$$F_p = 2\,l\,(a\,s + c) + C. \qquad \text{(c)}$$

Oprócz kosztów zakładowych samego toru elektrycznego, musimy wziąć jeszcze na uwagę część kosztów zakładowych elektrowni, spowodowanych obecnością naszego toru elektrycznego. Gdyby odbiorniki prądu były przyłączone wprost do źródła, bez pośrednictwa przewodów, wówczas moc elektrowni byłaby dostosowana do mocy pożytecznie odbieranej. Wskutek jednak obecności toru moc elektrowni musi być powiększona, aby mogła pokonać największe możliwe straty w przewodach naszego toru. Moc tych strat największych wyraża się wzorem:

$$\left(I_{max}\right)^2 \frac{2\,l}{k\,s} \quad \text{watów},$$

gdzie I_{max} oznacza prąd największego obciążenia naszego toru. Podzielmy teraz koszta zakładowe całej elektrowni przez moc największego obciążenia elektrowni, wyrażoną w watach, a otrzymamy pewną średniówkę b. Będzie to koszt elektrowni na 1 wat największego obciążenia. Wobec tego koszt powiększenia elektrowni dla pokonania strat w przewodach F_e wyrazi się wzorem:

$$F_e = b\left(I_{max}\right)^2 \frac{2\,l}{k\,s}. \qquad \text{(d)}$$

Suma kosztów $F_p + F_e$ da nam całkowite koszta zakładowe, wywołane potrzebą przesyłania prądu na odległość:

$$F_p + F_e = 2\,l\,(a\,s + c) + C + b\left(I_{max}\right)^2 \frac{2\,l}{k\,s}. \qquad \text{(e)}$$

Ustaliwszy koszta zakładowe, możemy przejść do obliczenia rocznych kosztów przesyłania prądu K. Koszta te składają się z dwóch pozycyj: 1) kosztów bezpośrednich K_b i 2) kosztów pośrednich K_a.

Do pierwszej kategorji zaliczamy wszystkie wydatki bieżące na materjały (paliwo, smary i t. d.) i robociznę dla wytworzenia energji elektrycznej, traconej w przewodach. Ażeby ująć to w liczby, podzielmy całoroczne wydatki elektrowni na materjały i robociznę przez liczbę watogodzin, wysyłanych z elektrowni w ciągu roku. Otrzymamy średniówkę β, która będzie średnim kosztem bezpośrednim jednej watogodziny, wysłanej z elektrowni. Iloczyn liczby watogodzin, straconych w przewodach w ciągu roku, przez średniówkę β da nam sumę kosztów bezpośrednich K_b.

Co się tyczy strat w przewodach, to straty te są wielkością zmienną, zależną od prądu przewodowego I. Stosownie do pory dnia i pory roku zmienia się prąd i zmieniają się straty w przewodach. Największe straty wypadają przy największem obciążeniu (I_{max}), a moc ich wyraża się wzorem:

$$\left(I_{max}\right)^2 \frac{2\,l}{k\,s} \quad \text{watów}.$$

Podzielmy liczbę watogodzin, straconych przy zmiennem obciążeniu w ciągu roku, przez liczbę watów, traconych przy największem obciążeniu, a otrzymamy średniówkę T. Jest to umyślona liczba godzin, która wyraża średni roczny czas trwania największych strat w przewodach. Tak więc całoroczne straty naszego toru wyrażają się wzorem:

$$\left(I_{max}\right)^2 \frac{2\,l}{k\,s}\,T \quad \text{watogodzin},$$

a koszta bezpośrednie przesyłania prądu:

$$K_b = \beta \left(I_{max}\right)^2 \frac{2\,l}{k\,s}\,T. \tag{f}$$

Koszta pośrednie K_a są to koszta kapitału. Zaliczamy do nich oprocentowanie kapitału, umorzenie, zysk wreszcie wydatki na utrzymanie urządzeń w należytym stanie i odpisy na odnawianie urządzeń. Dwie ostatnie pozycje zależą nie tylko od warunków gospodarczych, ale i od rodzaju urządzeń. Całkowite koszta pośrednie stanowią pewien odsetek od kapitału, który dla urządzeń elektrowni oznaczymy przez $p_e\%$, a dla urządzeń toru elektrycznego... $p_p\%$. Tak więc roczne koszta pośrednie wyniosą:

$$K_a = \frac{p_p}{100} F_p + \frac{p_e}{100} F_e = \frac{p_p}{100}\Big[2\,l\,(as + c) + C\Big] + \frac{p_e}{100} b \left(I_{max}\right)^2 \frac{2\,l}{ks}, \tag{g}$$

a całkowite koszta przesyłania prądu:

$$K = K_b + K_a = \beta \left(I_{\max}\right)^2 \frac{2\,l}{k\,s}\,T +$$

$$+ \frac{p_p}{100}\left[2\,l\,(a\,s + c) + C\right] + \frac{p_e}{100}\,b\left(I_{\max}\right)^2 \frac{2\,l}{k\,s}, \qquad \text{(h)}$$

czyli

$$K = \underbrace{2\,l\,\frac{p_p}{100}\,a\,s + \frac{p_p}{100}(2\,lc + C)}_{\text{„ kosztu przewodów}} + \underbrace{\frac{2\,l}{k\,s}\left(I_{\max}\right)^2\left(\frac{p_e}{100}\,b + \beta\,T\right)}_{\text{„ kosztu elektrowni + koszt prądu}}. \qquad (59)$$

§ 27. Przekrój gospodarczo najkorzystniejszy.

Wzór (59) możemy rozpatrywać, jako zależność kosztów przesyłania prądu K od zmiennego przekroju przewodów s. Dla uproszczenia wzoru oznaczmy przez A, B i D następujące wielkości stałe:

$$A = 2\,l\,\frac{p_p}{100}\,a,$$

$$B = \frac{p_p}{100}(2\,lc + C),$$

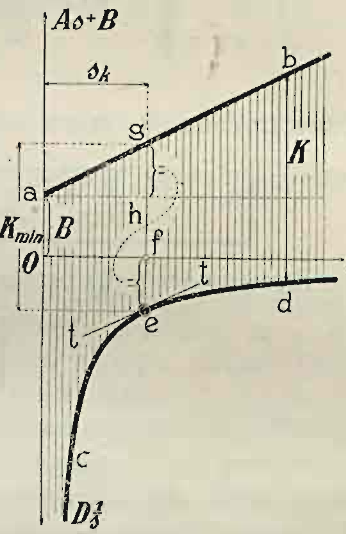
$$D = \frac{2\,l}{k}\left(I_{\max}\right)^2\left(\frac{p_e}{100}\,b + \beta T\right). \qquad \text{(a)}$$

Koszta przesyłania prądu

$$K = A\,s + B + D\,\frac{1}{s} = f(s) \qquad \text{(b)}$$

składają się z trzech pozycyj: 1) proporcjonalnej do przekroju s, 2) niezależnej od przekroju i 3) odwrotnie proporcjonalnej do s.

Przedstawmy tę zależność wykreślnie (rys. 99). Na osi odciętych odkładamy zmienne przekroje s, na osi rzędnych w górę ... $A\,s + B$, a w dół ... $D\,\frac{1}{s}$. Górna część wykresu, ograniczona prostą $a\,b$, wyobraża sumę wszelkich odsetek od kapitału, wyłożonego na przewody, a część dolna, ograniczona hyperbolą równoramienną $c\,d$, — sumę odsetek od kapitału, wyłożonego na elektrownię wraz z kosztami prądu.



Rys. 99.

Rzędne, zawarte między obiema kresami, przedstawiają całkowite koszta przesyłania prądu ... K. Koszta te przy $s = 0$ byłyby nieskończenie wielkie, ze wzrostem przekroju początkowo maleją, osiągają minimum, a potem wzrastają.

Chcąc znaleźć sposobem wykreślnym przekrój gospodarczo najkorzystniejszy s_k, przy którym koszta K osiągają minimum, kreślimy prostą tt, równoległą do kresy ab, a styczną do hyperboli cd. Znajdujemy punkt styku e. Rzędna tego punktu $\overline{ge}$ przedstawia najmniejsze koszta K_{min}, a odcięta $\overline{Of}$... przekrój s_k.

To samo zadanie rozwiążemy rachunkowo. Ażeby znaleźć K_{min}, różniczkujemy równanie (b):

$$\frac{dK}{ds} = A - D\frac{1}{s_k^2} = 0 \tag{c}$$

i znajdujemy:

$$s_k = \sqrt{\frac{D}{A}} = \sqrt{\frac{\frac{2l}{k}\left(I_{\max}\right)^2\left(\frac{p_e}{100}b + \beta T\right)}{2l\frac{p_p}{100}a}} = I_{\max}\frac{\sqrt{\frac{p_e}{100}b + \beta T}}{\sqrt{\frac{p_p}{100}ak}} \tag{d}$$

zależy od elektrowni

zależy od miedzi, przewodów

Oznaczmy licznik i mianownik tego ułamku literami n_e, n_p:

$$\boxed{n_e = \sqrt{\frac{p_e}{100}b + \beta T}} \qquad \boxed{n_p = \sqrt{\frac{p_p}{100}ak}}, \tag{60}$$

a otrzymamy wzór dla przekroju gospodarczo najkorzystniejszego:

$$\boxed{s_k = I_{\max}\frac{n_e}{n_p}}. \tag{61}$$

P r z e k r ó j g o s p o d a r c z o n a j k o r z y s t n i e j s z y j e s t p r o p o r c j o n a l n y d o p r ą d u n a j w i ę k s z e g o o b c i ą ż e n i a. Innemi słowy, przewody, obliczone na gospodarność dla jednakowych warunków gospodarczych, mają stałą gęstość prądu J_k, którą będziemy nazywali g ę s t o ś c i ą p r ą d u g o s p o d a r c z o n a j k o r z y s t n i e j s z ą:

$$J_k = \frac{I_{\max}}{s_k} = \frac{I_{\max}}{I_{\max}\frac{n_e}{n_p}}$$

$$\boxed{J_k = \frac{n_p}{n_e}}. \tag{62}$$

Co się tyczy spółczynników n_e i n_p, to pierwszy z nich zależy od wielkości: p_e, b, β z dziedziny wytwarzania prądu, a drugi — od wielkości: p_p, a, k z dziedziny przewodzenia prądu. Wobec tego, spółczynnik n_e nazwiemy spółczynnikiem gospodarczym wytwarzania, a n_p—spółczynnikiem gospodarczym przewodzenia.

Ze wzoru (d) wynika, że przekroje, obliczone na gospodarność, są tem większe, im większe są średniówki b, β i T, i im mniejsza jest średniówka a. Innemi słowy, przekroje wypadają tem większe, im kosztowniejsza jest elektrownia na 1 W mocy (b), im kosztowniejszy jest prąd (β), im bardziej wyzyskany jest przewód (T) i wreszcie im tańszy jest przewód na 1 m długości i 1 mm^2 przekroju (a). A więc, przewody, czerpiące prąd z elektrowni większej, ekonomiczniejszej, mogą być cieńsze, niż z elektrowni małej; przewody z elektrowni wodnej — cieńsze, niż z elektrowni parowej; przewody z obciążeniem równomiernem i stałem muszą być grubsze od przewodów z obciążeniem wahliwem, dorywczem; wreszcie linje kablowe otrzymają przekroje mniejsze od napowietrznych.

Wróćmy jeszcze do równania (c)

$$A - D\frac{1}{s_k^2} = 0,$$

z którego możemy wyprowadzić, że

$$As_k = D\frac{1}{s_k}. \tag{e}$$

Z trzech pozycyj, z których składają się najmniejsze koszta przesyłania prądu:

$$K_{min} = As_k + B + D\frac{1}{s_k},$$

pozycja pierwsza i trzecia są sobie równe. Na wykresie (rys. 99) odcinek gh równa się odcinkowi fe. Stąd wyprowadzamy prawidło, że **przy najmniejszych kosztach przesyłania prądu część tych kosztów, proporcjonalna do przekroju, musi się równać kosztom odwrotnie proporcjonalnym do przekroju.** Jest to najstarsze prawidło z dziedzy obliczania przewodów. Thompsona

Wyprowadzając wzór (59), przypuszczaliśmy, iż obliczany tor elektryczny wraz z elektrownią stanowią wspólnotę gospodarczą. Gdy właściciel toru elektrycznego jest odbiorcą prądu obcej elektrowni, wówczas nie będą go obchodziły koszta zakładowe elektrowni, ani koszta ruchu elektrowni, lecz będzie się kierował jedynie tylko ceną za prąd, którą na mocy umowy musi płacić zakładom elektrycznym. Wówczas, przy obliczaniu kosztów przesyłania prądu (wzór 59) i przy obliczaniu przekroju (wzór 60) należy ze wzorów usunąć człon:

$$\frac{p_e}{100}b,$$

a w następnym członie $\beta.T$ należy rozumieć przez średniowkę β — umówioną cenę jednej watogodziny.

Przykład 29. Elektrownia ma zbudować własnym kosztem tor elektryczny do zasilania prądem zakładu przemysłowego. Największy przewidywany prąd... 100 A. Obliczyć przekrój: 1) w razie zastosowania przewodu napowietrznego i 2) w razie zastosowania kabli.

$p_e = 11{,}42\%$; $p_p' = 13{,}61\%$ — napow.; $p_p'' = 10{,}36\%$ — kable; $b = 0{,}9$ Złp.;/1 W

$\beta = 0{,}0001$ Złp.; $T = 2400$ godz.; $a' = 0{,}021$ Złp. — napow.; $a'' = 0{,}033$ Złp. — kable;

$$k = 57 \frac{m}{\Omega\, mm^2}.$$

Spółczynnik gospodarczy wytwarzania:

$$n_e = \sqrt{0{,}1142 \,.\, 0{,}9 + 0{,}0001 \,.\, 2400} = 0{,}586.$$

W razie zastosowania przewodów napowietrznych spółczynnik przewodzenia wyniesie:

$$n_p' = \sqrt{0{,}1361 \,.\, 0{,}021 \,.\, 57} = 0{,}404,$$

a przekrój gospodarczo najkorzystniejszy:

$$s_k' = 100 \frac{0{,}586}{0{,}404} = 143 \approx 150\, mm^2 \text{ (albo } 2 \,.\, 70\, mm^2 \text{ — patrz przykład 36).}$$

W razie zastosowania kabli spółczynnik przewodzenia wyniesie:

$$n_p'' = \sqrt{0{,}1036 \,.\, 0{,}033 \,.\, 57} = 0{,}442,$$

a przekrój gospodarczo najkorzystniejszy:

$$s_k'' = 100 \frac{0{,}586}{0{,}442} = 132 \approx 120\, mm^2.$$

§ 28. Spadek napięcia gospodarczo najkorzystniejszy.

W torze elektrycznym, obliczonym na gospodarność, największy spadek napięcia wyniesie:

$$\Delta E_{\max} = I_{\max} \frac{2\, l}{k\, s_k} = \frac{I_{\max}\, 2\, l\, n_p}{k\, I_{\max}\, n_e} = \frac{2\, l\, n_p}{k\, n_e}. \tag{63}$$

Z równania tego widać, że gospodarczy spadek napięcia zależy od spółczynników gospodarczych (n_p, n_e), od przewodności (k) i od długości toru (l). Spadek dopuszczamy tem większy, im tor jest dłuższy. Natomiast zupełnie nie zależy gospodarczy spadek napięcia ani od prądu, ani od napięcia roboczego.

Przy zwykłem obliczaniu przewodów na spadek napięcia (rozdz. IV) spadek dopuszczalny wynosił pewien odsetek napięcia roboczego

(§ 2), a więc był proporcjonalny do napięcia. Przez powiększenie napięcia roboczego powiększał się dopuszczalny spadek napięcia, a zmniejszał się prąd przewodowy. Oba czynniki wpływały w jednakowym kierunku na zmniejszenie przekroju:

$$s = \frac{2 I l}{k \Delta E}.$$

A więc przekroje wypadały odwrotnie proporcjonalne do drugiej potęgi napięcia roboczego. Przy napięciu podwójnem — przekroje cztery razy mniejsze.

Przy obliczaniu zaś na gospodarność spadek napięcia ma wartość stałą. Przez powiększanie napięcia roboczego zmienia się tylko prąd przewodowy:

$$s = \frac{2 I l}{k \Delta E}.$$

A więc przekroje gospodarcze wypadają odwrotnie proporcjonalne do pierwszej potęgi napięcia roboczego. Przy napięciu podwójnem — przekroje dwa razy mniejsze.

Jak już mówiliśmy wyżej, gospodarczy spadek napięcia na mocy wzoru (63) jest tem większy, im tor jest dłuższy. Stacje odbiorcze bardziej odległe będą miały napięcie niższe od stacyj mniej od elektrowni odległych. W warunkach zwykłych niema nic w tem złego. Bywają jednak przypadki, że kilka torów rozmaitej długości doprowadza prąd do jednej wspólnej instalacji i że równość napięcia w punktach zasilających jest wówczas warunkiem nieodzownym. Obliczanie przekroju wg wzoru (61) byłoby błędne. Wzór ten można stosować tylko do torów, nie skrępowanych żadnym warunkiem i niezależnych jeden od drugiego. Tory zaś zasilające trzeba uważać za jedną nierozdzielną całość gospodarczą. Zamiast obliczać przekroje każdego toru zosobna, należy obliczyć dla wszystkich jeden wspólny gospodarczo najkorzystniejszy spadek napięcia.

Wróćmy do wzoru kosztów przesyłania prądu (59), podstawmy:

$$s = \frac{2 I_{max} l}{k \Delta E_{max}},$$

a otrzymamy:

$$K = \frac{4 I_{max} l^2}{k \Delta E_{max}} \underbrace{\frac{p_p}{100} a}_{\frac{n_p^2}{k}} + \frac{p_p}{100}\left(2lc + C\right) + \Delta E_{max} I_{max} \underbrace{\left(\frac{p_e}{100} b + \beta T\right)}_{n_e^2}$$

czyli

$$K = \frac{4\, I_{\max}\, l^2\, n_p^2}{k^2\, \Delta E_{\max}} + \frac{p_p}{100}\left(2\, l\, c + C\right) + \Delta E_{\max}\, I_{\max}\, n_e^2. \qquad \text{(a)}$$

Przypuśćmy, że mamy n torów zasilających i oznaczmy roczne koszta przesyłania prądu po tych torach przez $K_1, K_2 \ldots K_\alpha \ldots K_n$, długości tych torów: $l_1, l_2 \ldots l_\alpha \ldots l_n$, największe płynące po nich prądy: $I_1, I_2 \ldots I_\alpha \ldots I_n$, a wspólny dla wszystkich największy spadek napięcia... ΔE. Wzorując się na równaniu (a), zestawimy koszta przesyłania prądu we wszystkich n torach zasilających:

$$K_1 = \frac{4\, I_1\, l_1^2\, n_p^2}{k^2\, \Delta E} + \frac{p_p}{100}\left(2 l_1 c + C\right) + \Delta E\, I_1\, n_e^2$$

$$K_2 = \frac{4\, I_2\, l_2^2\, n_p^2}{k^2\, \Delta E} + \frac{p_p}{100}\left(2 l_2 c + C\right) + \Delta E\, I_2\, n_e^2$$

. . . .

$$K_n = \frac{4\, I_n\, l_n^2\, n_p^2}{k^2\, \Delta E} + \frac{p_p}{100}\left(2 l_n c + C\right) + \Delta E\, I_n\, n_e^2.$$

Suma tych kosztów wyrazi się wzorem:

$$K = \frac{4\, n_p^2}{k^2\, \Delta E} \sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} I_\alpha l_\alpha^2 + \frac{p_p}{100}\left(2\, c \sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} l_\alpha + n\, C\right) + \Delta E\, n_e^2 \sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} I_\alpha. \qquad (64)$$

Wzór ten będziemy rozpatrywać, jako zależność kosztów K od zmiennego spadku napięcia ΔE. Dla uproszczenia wzoru wprowadzimy następujące oznaczenia:

$$R = \frac{4\, n_p^2}{k^2} \sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} I_\alpha l_\alpha^2; \quad S = \frac{p_p}{100}\left(2\, c \sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} l_\alpha + n\, C\right); \quad U = n_e^2 \sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} I_\alpha. \qquad \text{(b)}$$

Otrzymujemy wzór:

$$K = R\, \frac{1}{\Delta E} + S + U\, \Delta E. \qquad \text{(c)}$$

Aby znaleźć gospodarczo najkorzystniejszy spadek napięcia ΔE_k, przy którym koszta K stanowiłyby minimum, różniczkujemy równanie (c):

$$\frac{dK}{d\, \Delta E} = -R\, \frac{1}{\Delta E_k^2} + U = 0 \qquad \text{(d)}$$

i otrzymujemy wzór:

$$\Delta E_k = \sqrt{\frac{R}{U}}$$

$$\Delta E_k = \frac{2\, n_p}{k\; n_e} \sqrt{\frac{I_1 l_1^2 + I_2 l_2^2 + \ldots + I_\alpha l_\alpha^2 \ldots + I_n l_n^2}{I_1 + I_2 + \ldots + I_\alpha + \ldots + I_n}} = \frac{2\, n_p}{k\, n_e} \lambda$$

czyli

$$\boxed{\Delta E_k = \frac{2\, n_p}{k n_e} \lambda \qquad \lambda = \sqrt{\frac{\sum\limits_{\alpha=1}^{\alpha=n} I_\alpha l_\alpha^2}{\sum\limits_{\alpha=1}^{\alpha=n} I_\alpha}}} \; . \tag{65}$$

Wartość pierwiastka jest długością umyśloną λ czyli do pewnego stopnia „średnią" długością wszystkich torów zasilających. Wzór (63) na spadek napięcia w pojedyńczym torze zasilającym otrzymamy ze wzoru ogólnego (65), podstawiając, zamiast umyślonej długości λ, rzeczywistą długość toru l.

Gdy porównamy długość λ ze wzoru (65) z długością umyśloną wzoru (52) do obliczania toru rozgałęzionego na minimum objętości, to przekonamy się, że oba te wzory są identyczne.

Przykład 30. Miejska sieć rozsyłowa otrzymuje prąd za pośrednictwem sześciu punktów zasilających (rys. 118), z których jeden znajduje się w elektrowni, a pozostałe łączą się z elektrownią jednożyłowemi kablami podziemnemi. Obliczyć przekroje kabli.

Tor	I	o długości	0	m	jest obciążony	prądem	85	A.
„	II	„	1400	„	„	„	120	„
„	III	„	1700	„	„	„	110	„
„	IV	„	750	„	„	„	200	„
„	V	„	1600	„	„	„	190	„
„	VI	„	2050	„	„	„	90	„

$p_e = 11{,}42\%$; $p_p = 10{,}36\%$; $b = 2$ Złp.; $\beta = 0{,}00025$ Złp.; $T = 1670$ godz.;

$$k = 57 \frac{m}{\Omega\, mm^2}; \quad a = 0{,}0255 \text{ Złp.}$$

Spółczynniki gospodarcze:

$$n_e = \sqrt{0{,}1142 \,.\, 2 + 0{,}00025 \,.\, 1670} = 0{,}802 \qquad n_p = \sqrt{0{,}1036 \,.\, 0{,}0255 \,.\, 57} = 0{,}388.$$

Długość umyślona:

$$\lambda = \sqrt{\frac{85 \,.\, 0 + 120 \,.\, 1400^2 + 110 \,.\, 1700^2 + 200 \,.\, 750^2 + 190 \,.\, 1600^2 + 90 \,.\, 2050^2}{85 + 120 + 110 + 200 + 190 + 90}} = 1384\, m.$$

Spadek napięcia gospodarczo najkorzystniejszy:

$$\Delta E_k = \frac{2 \,.\, 0{,}388}{57 \,.\, 0{,}802} 1384 = 23{,}6\; V.$$

Przekroje gospodarczo najkorzystniejsze:

$$s_{II}=\frac{2\,.\,120\,.\,1400}{57\,.\,23{,}6}=249\approx 240\ mm^2;\quad s_{III}=\frac{2\,.\,110\,.\,1700}{57\,.\,23{,}6}=278\approx 300\ mm^2;$$

$$s_{IV}=\frac{2\,.\,200\,.\,750}{57\,.\,23{,}6}=222\approx 240\ mm^2;\quad s_{V}=\frac{2\,.\,190\,.\,1600}{57\,.\,23{,}6}=452\approx 500\ mm^2;$$

$$s_{VI}=\frac{2\,.\,90\,.\,2050}{57\,.\,23{,}6}=274\approx 300\ mm^2.$$

Średni rzeczywisty spadek napięcia w torach zasilających:

$$\Delta E_{śr}=\frac{2}{57\,.\,5}\left(\frac{120\,.\,1400}{240}+\frac{110\,.\,1700}{300}+\frac{200\,.\,750}{240}+\frac{190\,.\,1600}{500}+\frac{90\,.\,2050}{300}\right)=22{,}3\ V.$$

Tor, doprowadzający prąd do punktu zasilającego w elektrowni, należy zaopatrzyć w opornik, któryby dla równości napięcia w sieci niweczył 22,3 V przy 85 A. Oporność opornika wypada:

$$\frac{22{,}3}{85}=0{,}262\ \Omega.$$

Sieci kolei elektrycznych bywają zwykle niesymetryczne; przewody jezdne doprowadzają prąd, a szyny — odprowadzają. Sieć przewodów jezdnych otrzymuje prąd za pośrednictwem dosyłowych punktów zasilających, a sieć szyn kolejowych oddaje prąd za pośrednictwem innych punktów zasilających tak zw. odsyłowych. Wobec tego tory zasilające są również niesymetryczne. Spadek napięcia dopuszczalny w torach zasilających ΔE dzieli się na dwa bieguny, na spadek w przewodach dosyłowych Δe^+ i spadek w przewodach odsyłowych Δe^-:

$$\Delta E=\Delta e^+ + \Delta e^-. \tag{e}$$

Wzór na obliczenie gospodarczo najkorzystniejszego spadku napięcia w przewodach zasilających jednobiegunowych (a więc dosyłowych lub odsyłowych) otrzymamy ze wzoru (65) przez skreślenie spółczynnika liczbowego „2“:

$$\Delta e_k=\frac{n_p}{k\,n_e}\lambda \tag{66}$$

Wyprowadzając wzory (64) i (65), przypuszczaliśmy, że wszystkie tory zasilające będą wykonane z przewodów jednakowych o równych przewodnościach k i równych spółczynnikach gospodarczych n_p. Gdyby miało być inaczej, a więc np. gdyby przewody częściowo były kablowe, a częściowo napowietrzne, lub gdyby były z różnych metali, wówczas należałoby to uwzględnić przy sumowaniu kosztów $K_1, K_2, \ldots K_n$. Wzór ostateczny wypadłby następujący:

$$\Delta E_k=\frac{2}{n_e}\sqrt{\frac{\frac{n_{p_1}^2}{k_1^2}I_1 l_1^2+\frac{n_{p_2}^2}{k_2^2}I_2 l_2^2+\ldots+\frac{n_{p\alpha}^2}{k_\alpha^2}I_\alpha l_\alpha^2+\ldots+\frac{n_{pn}^2}{k_n^2}I_n l_n^2}{I_1+I_2+\ldots+I_\alpha+\ldots+I_n}},$$

czyli

$$\Delta E_k = \frac{2}{n_e}\sqrt{\frac{\sum\limits_{\alpha=1}^{\alpha=n} \frac{n_{p\alpha}^2}{k_\alpha^2} I_\alpha l_\alpha^2}{\sum\limits_{\alpha=1}^{\alpha=n} I_\alpha}}. \tag{67}$$

§ 29. Spółczynniki gospodarcze.

Koszt przewodów. Koszt 1 m przewodu pojedyńczego wraz z przyborami i montażem wyraża się wzorem

$$a s + c.$$

Dla orjentacji podajemy tabelę spółczynników a i c dla przewodów miedzianych wg cen przedwojennych we frankach złotych. Spółczynniki te odpowiadają kursowi miedzi 70 £ za tonnę. Zmiana kursu o każde 10 £ zwiększa wzgl. zmniejsza spółczynnik a o... 0,0027 fr. zł.

Tablica II. *Koszt przewodów miedzianych.*

NAZWA PRZEWODU	Napięcie	Cena przedwojenna we fr. zł. a	Cena przedwojenna we fr. zł. c
Przewód napowietrzny			
niezawieszony	do 3 000 V	0,021	—
zawieszony; po 2 przewody na wspólnym słupie .	do 3 000 V	0,021	0,28
„ „ 4 „ „ „ „	do 3 000 V	0,021	0,21
„ „ 8 „ „ „ „	do 3 000 V	0,021	0,16
Kabel			
jednożyłowy niezałożony	do 1 000 V	0,0255	0,85
„ zakopany; po 2 kable w jednym rowie	do 1 000 V	0,0255	3,65
„ „ „ 3 „ „ „ „	do 1 000 V	0,0255	2,90
„ „ „ 5 „ „ „ „	do 1 000 V	0,0255	2,60
„ „ „ 7 „ „ „ „	do 1 000 V	0,0255	2,10
dwużyłowy niezałożony	do 1 000 V	0,0335	0,73
„ zakopany pojedyńczo w ziemi	do 1 000 V	0,0335	3,20
trójżyłowy niezałożony	do 1 000 V	0,0270	0,70
„ zakopany pojedyńczo w ziemi	do 1 000 V	0,0270	2,50
„ niezałożony	do 3 000 V	0,0295	0,85
„ zakopany pojedyńczo w ziemi	do 3 000 V	0,0295	2,50
„ niezałożony	do 6 000 V	0,0330	1,10
„ zakopany pojedyńczo w ziemi	do 6 000 V	0,0330	2,75
„ niezałożny . . . , ...	do 10 000 V	0,0330	1,65
„ zakopany pojedyńczo w ziemi	do 10 000 V	0,0330	3,30

Koszt elektrowni. Należy odróżniać wielkość b czyli „koszt elektrowni na 1 W największego obciążenia“ od „kosztu elektrowni na 1 W zainstalowanej mocy“. Największe obciążenie elektrowni wynosi zwykle 60% do 75% mocy zainstalowanej czyli sumarycznej mocy wszystkich źródeł prądu.

W mniejszych zakładach liczono przed wojną koszt elektrowni na 1 W największego obciążenia b od 2,1 do 1,1 fr. zł., a w wielkich — do 0,5 fr. zł.

Koszt prądu. Koszta bezpośrednie β jednej watogodziny, oddanej z elektrowni, liczono od 0,000 25 do 0,000 12, a w wielkich elektrowniach — do 0,000 04 fr. zł.

Odsetki p_e i p_p składają się 1) z oprocentowania kapitału, 2) zysku, 3) umorzenia kapitału, 4) utrzymania urządzeń i 5) odnowienia urządzeń. Kapitał, ulokowany w przedsiębiorstwie, musi być przedewszystkiem normalnie oprocentowany. Stopa procentowa zależy od stanu rynku pieniężnego. Akcjonarjusze, lokując kapitał w przedsiębiorstwie, wymagają wzamian za ryzyko i za inicjatywę pewnej nadwyżki procentowej czyli zysku. Nieraz jednostki samorządowe w umowie koncesyjnej zastrzegają się, że po tylu a tylu latach całe urządzenie przemysłowe przechodzi bezpłatnie na własność gminy, czy miasta. W tych przypadkach przedsiębiorca musi rok rocznie czynić dodatkowe odpisy na umorzenie kapitału, aby przy wygaśnięciu koncesji odpisy te wraz z procentami składanemi dały zpowrotem cały kapitał zakładowy. Jednostki samorządowe również czynią nieraz odpisy na umorzenie kapitału, aby pospłacać zaciągnięte pożyczki, czy zobowiązania. Procent na umorzenie kapitału w ciągu m lat przy stopie procentowej $q\%$ oblicza się wg wzoru:

$$p_a = \frac{q}{\left(1 + \frac{q}{100}\right)^m - 1}. \qquad (68)$$

Wyłuszczone powyżej odsetki na oprocentowanie, zysk i umorzenie stanowią koszta samego kapitału i nie zależą zupełnie od urządzeń technicznych, w których kapitał został ulokowany.

Urządzenia techniczne wymagają przedewszystkiem utrzymania ich w należytym stanie, a więc pewnych uzupełnień, wymiany części zużytych i zniszczonych. Stawki procentowe od kapitału zakładowego na utrzymanie urządzeń zależą od rodzaju tych urządzeń (p. tabl. III). Żadne jednak urządzenie techniczne pomimo stałego utrzymywania nie jest wieczne. Jedno może przetrwać 100 lat, inne tylko 5, ale każde musi być z czasem zastąpione nowem i lepszem. Niekiedy urządzenie niszczy się wskutek wypadku przedwcześnie. Inne urządzenie mogłoby pracować dłużej, a usuwamy je od pracy, aby zastąpić nowszem, sprawniejszem i ekonomiczniejszem. Z tego wynika, że w każdej gospodarce technicznej muszą być czynione odpisy na odnowienie urządzeń (p. tabl. III).

Oznaczmy koszt zakupu pewnego urządzenia przez F_0. Przewidujemy, że urządzenie to przetrwa n lat, poczem będzie zastąpione nowem urządzeniem. Liczymy, że to nowe urządzenie będzie wymagało takiego samego kapitału F_0. Trzeba jednak uwzględnić, że urządzenie stare, jakkolwiek niezdatne do dalszego użytku będzie jeszcze przed-

Tablica III. *Odnowienie i utrzymanie urządzeń.*

URZĄDZENIE	Odnowienie: Liczba lat trwałości urządzenia n	Odnowienie: Stosunek kosztu odnowienia do kosztu zakupu $\frac{F_0 - F_n}{F_0}$	Odsetek na utrzymanie urządzenia p_t
Budynek, komin, fundamenty	100	0,90	0,5%
Kotły	12	0,90	1,5
Zbiorniki, podgrzewacze	20	0,70	1,5
Pompy	30	0,80	2,0
Przewody rurowe	30	0,90	1,0
Maszyny i turbiny parowe	20	0,80	1,5
Pędnie	30	0,80	1,0
Pasy, liny	4	0,85	2,0
Turbiny wodne	30	0,80	1,5
Maszyny elektryczne	25	0,70	1,5
Akumulatory	12 19	0,80 0,62	2,0
Przyrządy pomiarowe, rozdzielcze i ochronne	10	0,90	2,0 1,75
Transformatory	30	0,70	1,5
Podziemne sieci kablowe	30	0,70	0,2
Przewody napowietrzne	10	0,50	0,8
Słupy żelazne	25	0,90	1,0
Słupy drewniane	10	0,90	1,5

stawiało wartość sprzedażną F_n. Kapitał, który należy w ciągu n lat zarezerwować, wynosi zatem $F_0 - F_n$. Procent na odnowienie urządzenia przy stopie procentowej $q\%$ obliczymy wg wzoru:

$$p_r = \frac{F_0 - F_n}{F_0} \cdot \frac{q}{\left(1 + \frac{q}{100}\right)^n - 1}. \tag{69}$$

Przykład 31. Obliczyć odsetki p_e, p_p—dla kabli i p_p—dla linji napowietrznych. Przyjmujemy stopę 5-cio procentową. Na zysk doliczamy 3%. Kapitał zamierzamy umorzyć po upływie 35 lat, a więc roczny odsetek na umorzenie wyniesie:

$$p_a = \frac{5}{1{,}05^{35} - 1} = \frac{5}{5{,}516 - 1} = 1{,}11\%.$$

Odsetek na utrzymanie będzie liczbą średnią ze stawek, podanych w tabl. III dla poszczególnych urządzeń z uwzględnieniem wzajemnego stosunku wartości tych urządzeń.

Przypuśćmy, że z kapitału, wyłożonego na elektrownię, 27% pochłonie plac, budowle — 30%, kotły — 10%, przewody rurowe — 3%, turbiny parowe — 12%, maszyny elektryczne — 9% akumulatory — 2%, a rozdzielnia — 7%.

Odsetek na utrzymanie elektrowni wyniesie:

$$p'_t = \frac{0{,}5 \,.\, 30 + 1{,}5 \,.\, 10 + 1 \,.\, 3 + 1{,}5 \,.\, 12 + 1{,}5 \,.\, 9 + 2 \,.\, 2 + 2 \,.\, 7}{100} = 0{,}82\%;$$

odsetek na utrzymanie kabli:

$$p''_t = 0{,}2\%,$$

a na utrzymanie przewodów napowietrznych, przyjmując, że 55% kapitału pochłoną przewodniki, 35% — słupy żelazne, a 10% — słupy drewniane, —

$$p_t''' = \frac{0{,}8 \,.\, 55 + 1{,}0 \,.\, 35 + 1{,}5 \,.\, 10}{100} = 0{,}94\%.$$

Odsetki na odnowienie obliczymy dla każdego urządzenia osobno. Dla budowli wypadnie:

$$0{,}90 \frac{5}{1{,}05^{100} - 1} = 0{,}034\%,$$

dla kotłów — 5,65%, przewodów rurowych — 1,35%, turbin parowych — 1,20%, maszyn elektr. — 1,47%, akumulatorów — 5,03%, rozdzielni — 7,15%, kabli — 1,05%, przewodników — 3,97%, słupów żelaznych — 1,89%, a drewnianych — 7,15%. Wobec tego, odsetek na odnowienie urządzeń elektrowni wyniesie:

$$p'_r = \frac{0{,}034 \,.\, 30 + 5{,}65 \,.\, 10 + 1{,}35 \,.\, 3 + 1{,}2 \,.\, 12 + 1{,}47 \,.\, 9 + 5{,}03 \,.\, 2 + 7{,}15 \,.\, 7}{100} = 1{,}49\%,$$

kabli:

$$p''_r = 1{,}05\%,$$

a przewodów napowietrznych —

$$p_r''' = \frac{3{,}97 \,.\, 55 + 1{,}89 \,.\, 35 + 7{,}15 \,.\, 10}{100} = 3{,}56\%.$$

Całkowity procent p_e wypadnie zatem:

$$p_e = 5 + 3 + 1{,}11 + 0{,}82 + 1{,}49 = 11{,}42\%,$$

procent p_p dla kabli:

$$p_p = 5 + 3 + 1{,}11 + 0{,}2 + 1{,}05 = 10{,}36\%,$$

a dla przewodów napowietrznych:

$$p_p = 5 + 3 + 1{,}11 + 0{,}94 + 3{,}56 = 13{,}61\%.$$

§ 30. Czas trwania największych strat.

„Czas trwania największych strat" należy odróżniać od pojęć pokrewnych: „czasu użytkowania największej mocy" i „czasu użytkowania największego prądu".

Gdy podzielimy liczbę kilowatogodzin, pobranych w ciągu roku przez odbiornik, grupę odbiorników lub całą sieć rozsyłową, przez liczbę kilowatów największego obciążenia P_{max}, to otrzymamy umyśloną liczbę godzin, zwaną „czasem użytkowania największej mocy" — τ_p:

$$\tau_p = \frac{1}{P_{max}} \int\limits_{t=0}^{t=8760} P\,dt. \tag{a}$$

Gdy zaś podzielimy liczbę amperogodzin, zużytych w ciągu roku, przez liczbę amperów największego obciążenia I_{max}, to otrzymamy „czas użytkowania największego prądu" — τ_i:

$$\tau_i = \frac{1}{I_{max}} \int\limits_{t=0}^{t=8760} I\,dt. \tag{b}$$

Różnica między temi dwiema średniówkami jest niewielka, zależy od wahań napięcia i wynosi zwykle około 5%:

$$\tau_i \approx 1{,}05\,\tau_p.$$

Obliczmy „czas użytkowania największego prądu" sposobem wykreślnym. W tym celu zwracamy się do całorocznego wykresu zależności prądu I od czasu. Wykres taki, ułożony w porządku chronologicznym, dzień za dniem, byłby szeregiem zygzaków. Dla przejrzystości szeregujemy rzędne w tym wykresie nie w porządku chronologicznym, lecz wg wartości: od największych rzędnych do najmniejszych. Na rys. 100 na osi odciętych odłożono 8760 godzin rocznych, a na osi rzędnych — prąd I w amperach. Po uszeregowaniu rzędnych wg wartości otrzymano kresę *abc*. Obszar powierzchni wykresu *abcde* zastąpiono powierzchnią

Tablica IV. *Czas użytkowania największego prądu i czas trwania największych strat.*

	Roczna liczba godzin obciążenia	Czas użytkowania największego prądu t_I godzin	Czas trwania największych strat T godzin
Cała sieć elektrowni miejskiej lub okręgowej.			
Elektrownie francuskie (liczby średnie)	8760	3120	1670
Elektrownie niemieckie; miasto o liczbie mieszkańców:			
do 1 000 (liczby średnie ze statystyki roku 1920/21)	„	1900*	(1000)
od 1 000 „ 5 000	„	2420*	(1400)
„ 5 000 „ 10 000	„	2850*	(1700)
„ 10 000 „ 30 000	„	3240*	(2000)
„ 30 000 „ 50 000	„	3620*	(2400)
„ 50 000	„	4430*	(3100)
Elektrownia „Colfax“ (Stany Zjedn.) w 1920 r. . .	„	5200*	(3900)
Elektrownia okręg. w Czornewicach (Saksonja) 1921 r.	„	6450*	(5300)
Obciążenia teoretyczne. Wykres $I = f(t)$:			
1) prosta równoległa do osi odciętych (rys 101)	„	8760	8760
2) parabola wypukła	„	5840	4672
3) prosta pochyła od maximum do zera	„	4380	2920
4) parabola wklęsła	„	2920	1752
Instalacje specjalne (teoretyczne).			
Inst. przemysłowa: 300 dni po 10 godz.; obciążenie całkowite	3000	3000	3000
Inst. kolejowa: 365 dni po 16 godz.; $^3/_4$ obciąż. całkow.	5840	4380	3300
Oświetlenie uliczne całonocne bez wzgl. na księżyc	3650	3650	3650
„ „ gaszone o 11-ej przy księżycu	1120	1120	1120
„ „ połowa gaszona o 12-ej bez względu na księżyc	3650	2785	2350
Oświetlenie uliczne połowa gaszona o 11-ej przy księżycu	3650	2385	1755

Uwaga. Liczby oznaczone * wyprowadzono z „czasu użytkowania największej mocy“ przez dodanie 5%, liczby zaś, wzięte w nawias, wyprowadzono zapomocą wykresu (rys 101).

prostokąta *afge*. Zgodnie ze wzorem (b) szerokość prostokąta *eg* da nam wartość „czasu użytkowania największego prądu“ — τ_i

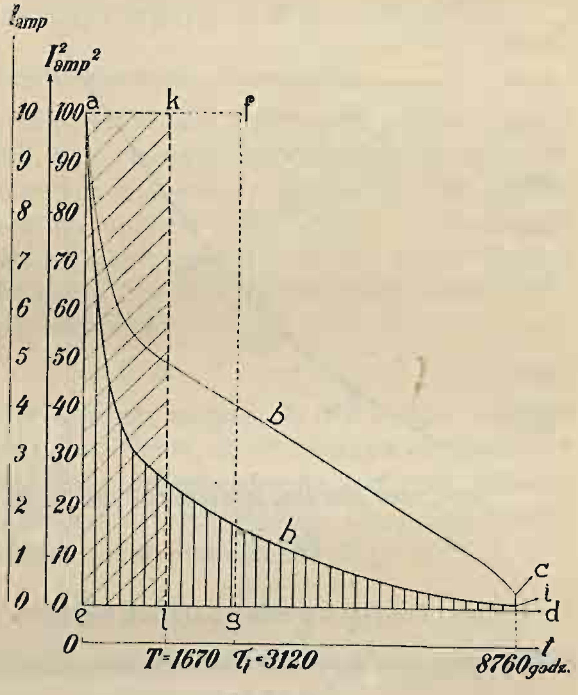
Przy obliczaniu przewodów na gospodarność interesuje nas inna średniówka, mianowicie „czas trwania największych strat“ T. Jest to iloraz liczby kilowatogodzin, straconych w ciągu roku w przewodach, przez moc największych strat:

$$T = \frac{1}{I_{max}^2 R}\int_{t=0}^{t=8760} I^2 R\,dt,$$

a po skróceniu przez R

$$\boxed{T = \frac{1}{I_{max}^2}\int_{t=0}^{t=8760} I^2\,dt} \quad (70)$$

Liczba kilowatogodzin, straconych w ciągu roku w przewodach przy obciążeniu rzeczywistem, jest taka sama, jakaby była stracona, gdyby przewody były obciążone prądem największym I_{max} w ciągu T godzin.



Rys. 100.

Znajdźmy liczbę T sposobem wykreślnym. Na rys. 100 pozostawiamy oś odciętych bez zmiany, a na osi rzędnych wprowadzamy nową podziałkę dla zmiennej — I^2. Podnosząc poprzednie rzędne do drugiej potęgi, otrzymujemy kresę *ahi*. Powierzchnię wykresu *ahide* (zacieniowaną pionowo), która przedstawia liczbę kilowatogodzin straconych w ciągu roku, zastępujemy powierzchnią prostokąta *akle* (zacieniowaną skośnie). Szerokość tego prostokąta będzie wielkością T.

Zachodzi pytanie, jaki jest stosunek wielkości τ_i do T. Rozpatrzmy cztery teoretyczne przypadki przebiegu obciążenia, w których kresa zależności prądu od czasu $I = f(t)$ dałaby się ująć w równanie.

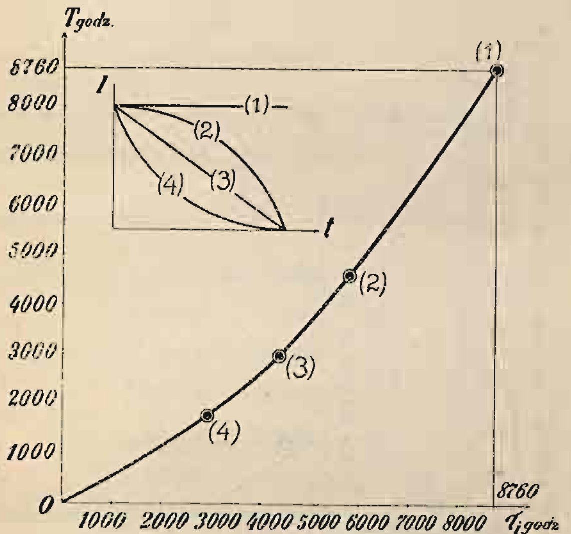
1. Obciążenie stałe. Kresa $I = f(t)$ w postaci linji prostej równoległej do osi rzędnych (rys. 101—1). Równanie kresy ... $I = I_{max}$.

$$T = \tau_i = 8760 \text{ godzin.}$$

2. Kresa $I=f(t)$ w postaci paraboli wypukłej (na rys. —2; wierzchołek na początku wykresu, u góry). Równanie kresy... $I = I_{max} \frac{8760^2 - t^2}{8760^2}$.

Całkowanie wg wzoru (b) daje $\tau_i = \frac{2}{3} 8760 = 5840$ godz., a całkowanie wg wzoru (70)... $T = \frac{8}{15} 8760 = 4672$ godzin.

3. Kresa $I=f(t)$ w postaci prostej pochyłej (na rys.—3). Równanie kresy... $I = I_{max} - \frac{I_{max}}{8760} t$; $\tau_i = \frac{1}{2} 8760 = 4380$ godzin. $T = \frac{1}{3} 8760 = 2920$ godzin.



Rys. 101.

4. Kresa $I=f(t)$ w postaci paraboli wklęsłej (na rys.—4; wierzchołek na końcu wykresu u dołu). Równanie kresy... $I = I_{max}\left(1 - 2\frac{t}{8760} + \frac{t^2}{8760^2}\right)$.

$\tau_i = \frac{1}{3} 8760 = 2920$ godzin; $T = \frac{1}{5} 8760 = 1752$ godzin.

Na rys. 101 na osi odciętych odłożono wartości τ_i, a na osi rzędnych ... T. Opierając się na wynikach zależności T od τ_i w czterech powyższych przypadkach obciążenia, wprowadzono do wykresu cztery punkty: (1), (2), (3) i (4). Krzywa, łącząca te punkty, może do pewnego stopnia charakteryzować zależność „czasu trwania największych strat" od „czasu użytkowania największego prądu". Ale tylko do pewnego stopnia. Ściśle biorąc, przy tym samym czasie użytkowania τ_i mogą wypaść najrozmaitsze wartości T, zależnie od kształtu kresy zasadniczej $I = f(t)$.

Tablica IV podaje wartości τ_i, T w różnych teoretycznych i praktycznych przypadkach obciążenia.