

## ROZDZIAŁ IX.

## Prąd zmienny.

## § 40. Rozpływ prądów.

Dotychczas mieliśmy do czynienia z prądem stałym. Przy prądach zmiennych będziemy się opierali na metodach i wzorach, ułożonych dla prądu stałego, wprowadzając tylko pewne poprawki i uzupełnienia, wynikające z właściwości prądu zmiennego.

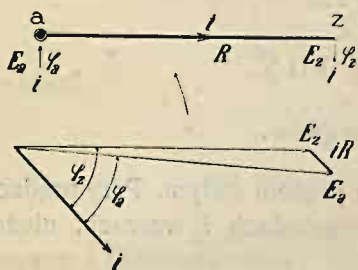
Prąd stały miał kierunek określony. Strzałkami oznaczaliśmy: 1) na przewodach pojedynczych — kierunek prądu, a 2) na torach — kierunek prądu w przewodzie dodatnim albo, co na jedno wychodzi, kierunek przepływu energii.

Prąd zmienny nie ma kierunku określonego. Na torach prądu zmiennego będziemy strzałkami znaczyli kierunek przepływu energii tak, jak przy prądzie stałym, a więc od źródła do odbiornika i od punktu zasilającego do odbiorczego.

Nowy czynnik, który przybywa w prądach zmiennych, to przesunięcie fazy między falą prądu a falą napięcia. W prądach stałych obciążenia różniły się od siebie tylko ilościowo (liczbą watów), tu zaś będą się różniły ilościowo i jakościowo. Rozróżniamy obciążenia opornościowe, indukcyjne i pojemnościowe. W obciążeniu opornościowym (bezindukcyjnym) fala prądu wpada w jedną fazę z falą napięcia, w indukcyjnym — prąd opóźnia się, czyli podąża za napięciem, wreszcie w pojemnościowym — wyprzedza napięcie. Lampy żarowe dają obciążenie opornościowe, silniki asynchroniczne — indukcyjne, a silniki synchroniczne przy normalnem wzbudzeniu — obciążenie opornościowe, przy niedostatecznem wzbudzeniu — indukcyjne, a przy nadmierem — pojemnościowe.

Dla ustalenia rozpływu prądów, rozkładu napięcia i kątów przesuwu fazy zastosujemy metodę wykresów wektorowych. Weźmy najprostszy przykład toru (rys. 120), obciążonego tylko na krańcu. Przypuśćmy, że obciążenie jest indukcyjne i daje przesuw  $\varphi$ , między napięciem  $E_s$  a prądem  $i$ . Początek toru będzie zasilany tym samym prądem  $i$ , ale napięcie  $E_a$  będzie inne i inny też będzie kąt przesuwu  $\varphi_a$ . Zbudujmy wykres,

któryby wyrażał wzajemną zależność tych wartości. Zaczynamy od wektora napięcia, panującego na krańcu toru ....  $E_s$  (rys. 120). Następnie kreślimy wektor prądu  $i$  z opóźnieniem o kąt  $\varphi_s$ . Wskutek oporności  $R$  w przewodach elektrycznych następuje pewna strata napięcia, której wartość równa się iloczynowi  $iR$ , a kierunek jest zgodny z kierunkiem prądu  $i$ . Dodajemy geometrycznie do napięcia  $E_s$  stratę  $iR$  i otrzymujemy napięcie, panujące na początku toru ....  $E_a$



Rys. 120.

$$\hat{E}_a = \hat{E}_s + iR.$$

Jednocześnie znajdujemy też kąt przesuwu  $\varphi_a$ .

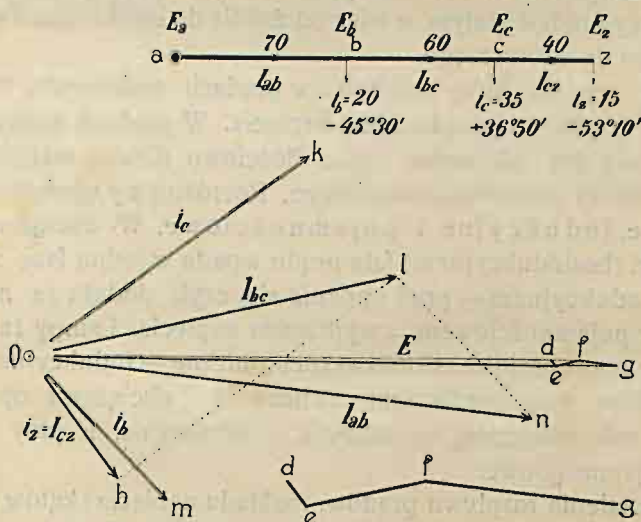
*Przykład 50.* Ustalić napięcia, prądy i kąty przesuwu w torze otwartym (rys. 121), obciążonym:

w punkcie  $b$  indukcyjnie prądem 20 A przy  $\cos \varphi_b = 0,7$  ( $\varphi_b = -45^\circ 30'$ )

„  $c$  pojemnościowo „ 35 „ „  $\cos \varphi_c = 0,8$  ( $\varphi_c = +36^\circ 50'$ )

„  $z$  indukcyjnie „ 15 „ „  $\cos \varphi_z = 0,6$  ( $\varphi_z = -53^\circ 10'$ ).

Przewody miedziane o przekroju  $16 \text{ mm}^2$ . Napięcie na krańcu ....  $E_s = 106,5 \text{ V}$ .



Rys. 121.

Skala wykresu (rys. 121): 1 A = 2 mm; 1 V = 1 mm.

Rozpoczynamy wykres od napięcia na krańcu toru. Odkładamy:

$$\overline{od} = E_s = 106,5 \text{ V} \quad \angle doh = -53^\circ 10' \quad \overline{oh} = i_z = 15 \text{ A.}$$

W odcinku  $cz$  płynie prąd  $I_{cz}$ , który równa się prądowi odbieranemu  $i_z = 15 \text{ A}$ . W odcinku tym powstaje strata napięcia o wartości:

$$\overline{\Delta E}_{cz} = I_{cz} R_{cz} = \frac{2 \cdot 15 \cdot 40}{57 \cdot 16} = 1,32 \text{ V}$$

w kierunku prądu  $I_{cz}$ . Kreślimy wektor  $\overline{de} = 1,32 \text{ V}$ , równoległy do  $\overline{oh}$ . Napięcie w punkcie  $c$  jest sumą geometryczną:

$$\hat{E}_c = \hat{E}_a + \hat{\Delta E}_{cz}.$$

Tę sumę wyobraża wektor  $\overline{oe}$ . W punkcie  $c$  mamy odbiór pojemnościowy, a więc odkładamy prąd tak, aby wyprzedzał napięcie:

$$\angle eok = +36^\circ 50' \quad \overline{ok} = i_o = 35 \text{ A}.$$

W odcinku  $bc$  płynie prąd  $I_{bc}$ , który równa się sumie geometrycznej prądów  $I_{cz}$ ,  $i_c$ :

$$\hat{I}_{bc} = \hat{I}_{cz} + \hat{i}_c.$$

Znajdujemy ten prąd w postaci wektora  $\overline{ol}$ . Zmierzywszy na wykresie długość tego wektora, dowiadujemy się, że prąd  $I_{bc} = 38,1 \text{ A}$ . Strata napięcia w odcinku  $bc$  wyniesie:

$$\overline{\Delta E}_{bc} = I_{bc} R_{bc} = \frac{2 \cdot 38,1 \cdot 60}{57 \cdot 16} = 5 \text{ V}.$$

Kreślimy wektor  $\overline{ef} = 5 \text{ V}$ , równoległy do  $\overline{ol}$ . Napięcie w punkcie  $b$  jest sumą geometryczną:

$$\hat{E}_b = \hat{E}_c + \hat{\Delta E}_{bc}.$$

Napięcie to wyobraża wektor  $\overline{of}$ . W punkcie  $b$  mamy odbiór indukcyjny. Odkładamy

$$\angle fom = -45^\circ 30' \quad \overline{om} = i_b = 20 \text{ A}.$$

W odcinku  $ab$  płynie prąd  $I_{ab}$ , który równa się sumie geometrycznej:

$$\hat{I}_{ab} = \hat{I}_{bc} + \hat{i}_b.$$

Znajdujemy ten prąd w postaci wektora  $\overline{on}$ . Zmierzywszy na wykresie długość tego wektora, dowiadujemy się, że prąd  $I_{ab} = 51,3 \text{ A}$ . Strata napięcia w odcinku  $ab$  wyniesie:

$$\overline{\Delta E}_{ab} = I_{ab} R_{ab} = \frac{2 \cdot 51,3 \cdot 70}{57 \cdot 16} = 7,87 \text{ V}.$$

Kreślimy wektor  $\overline{fg} = 7,87 \text{ V}$ , równoległy do  $\overline{on}$ . Napięcie zasilania  $E_a$  jest sumą geometryczną:

$$\hat{E}_a = \hat{E}_b + \hat{\Delta E}_{ab}.$$

Napięcie to wyobraża wektor  $\overline{og}$ . Zmierzywszy długość  $\overline{og}$ , znajdujemy, że  $E_a = 120 \text{ V}$ . Znajdujemy jednocześnie kąt przesuwu fazy prądu zasilania  $\angle gon = \varphi_a = -5^\circ 50'$ .

Zadanie powyższe możemy rozwiązać innym sposobem, znacznie prostszym, choć nieco mniej ścisłym. Już z wykresu na rys. 121 widać, że wektory napięcia  $E_a$ ,  $E_b$ ,  $E_c$  i  $E_z$  leżą prawie w jednej linii. Nie popełnimy zatem wielkiego błędu, gdy przyjmiemy, że kierunek wektora napięcia roboczego jest na całej długości toru jednokowy. Wychodząc z tego założenia, będziemy mogli wszystkie prądy odbierane rozłożyć na dwie składowe części: 1) prądy watowe — w kierunku napięcia i 2) prądy bezwatowe — w kierunku prostopadłym do napięcia. Rozłożywszy prądy w ten sposób, osobno obliczymy rozptyw prądów watowych, a osobno — bezwatowych. Dodając geometrycznie prądy przewodowe watowe z bezwatowymi, otrzymamy wreszcie rozptyw prądów rzeczywistych. Ustalenie rozptywu samych prądów watowych i samych prądów bezwatowych nie przedstawia żadnej trudności. Prądy te bowiem znajdują się w jednej fazie, a więc dodają się, nie geometrycznie, lecz algebraicznie tak, jak prądy stałe. Dla prądów bezwatowych jednak trzeba wprowadzić pewne uzupełnienie. Prądy te, niezależnie od zasadniczego kierunku (mamy tu na myśli: 1) zasilanie lub 2) odbiór), mają jeszcze swój własny zwrot wektorowy: 1) indukcyjny t.j. opóźniający się lub 2) pojemnościowy t.j. wyprzedzający.

*Kierunki zasadnicze prądów bezwatowych znaczymy strzałkami (prąd zasilania tak, jak dopływ, a prąd odbioru tak, jak odpływ), a własne zwroty wektorowe — znakami: plus i minus (plus — prąd wyprzedzający napięcie, minus — prąd opóźniający się). Przewodowym prądom bezwatowym nadajemy strzałkami takie same kierunki, jakie wypadły dla przewodowych prądów watowych, a następnie stawiamy znaki plusy i minusy wg wymagań I-go prawa Kirchhoffa. Znaki te ujawniają zwrot wektorowy rzeczywistych prądów przewodowych.*

*Przykład 51.* Tor ten sam, co w przykładzie 50. Ustalić rozptyw prądów. Rozkładamy prądy odbierane na watowe i bezwatowe:

$$\begin{aligned} \text{w punkcie } b \text{ prąd watowy } & \dots 20 \cos (-45^\circ 30') = 14,0 \text{ A,} \\ & \text{prąd bezwatowy } \dots 20 \sin (-45^\circ 30') = -14,2 \text{ A,} \\ \text{w punkcie } c \text{ prąd watowy } & \dots 35 \cos (+36^\circ 50') = 28,0 \text{ A,} \\ & \text{prąd bezwatowy } \dots 35 \sin (+36^\circ 50') = +21,0 \text{ A,} \\ \text{w punkcie } z \text{ prąd watowy } & \dots 15 \cos (-53^\circ 10') = 9,0 \text{ A,} \\ & \text{prąd bezwatowy } \dots 15 \sin (-53^\circ 10') = -12,0 \text{ A.} \end{aligned}$$

Rys. 122-I przedstawia rozptyw prądów watowych. W odcinku  $bc$  płynie  $9 + 28 = 37 \text{ A}$ , a w odcinku  $ab$  ....  $37 + 14 = 51 \text{ A}$ .

Na planie prądów bezwatowych (rys. 122-II) stawiamy strzałki o tych samych kierunkach, co w prądach watowych. W odcinku  $bc$  płynie  $-12 + 21 = +9 \text{ A}$

(znak plus mówi, że prąd wyprzedza napięcie), a w odcinku  $a b \dots + 9 - 14,2 = -5,2$  A (prąd opóźnia się).

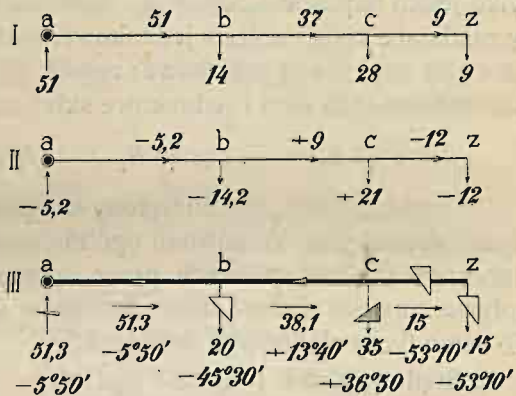
Znalezione przewodowe prądy watowe i bezwatowe dodajemy ze sobą geometrycznie i otrzymujemy rozptyw prądów rzeczywistych (rys. 122-III). W odcinku  $b c$  płynie prąd:

$$I_{bc} = \sqrt{37^2 + 9^2} = 38,1 \text{ A, przesunięty w fazie o kąt } \varphi_{bc} = \arctg\left(\frac{+9}{37}\right) = +13^\circ 40'$$

(znak plus w składniku bezwatowym mówi, że prąd wyprzedza napięcie), a w odcinku  $a b$  —

$$I_{ab} = \sqrt{51^2 + (-5,2)^2} = 51,3 \text{ A, przesunięty w fazie o kąt } \varphi_{ab} = \arctg\left(\frac{-5,2}{51}\right) = -5^\circ 50'$$

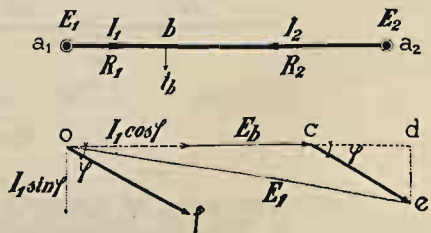
(prąd opóźnia się). Na rys. 122-III rozptyw prądów jest unaoczniony zapomocą trójkątów. Boki poziome przedstawiają prądy watowe, pionowe — bezwatowe (w górę idą wyprzedzające, na dół — opóźniające się), a przeciwprostokątne — prądy rzeczywiste. Trójkąty zacienione tyczą się prądów, wyprzedzających napięcie.



Rys. 122.

Chcąc ustalić rozptyw prądów metodą ścisłą, trzeba znać napięcie robocze na krańcu toru i oporności przewodów. Rozptyw prądów wg drugiej metody nie zależy ani od napięć, ani od oporności. To też, dopóki przekroje przewodów nie są jeszcze obliczone, rozptyw prądów możemy ustalić, posługując się tylko metodą drugą.

Przechodzimy do torów zamkniętych. Zaczynamy od przykładu najprostszego — od toru (rys. 123), obciążonego w jednym tylko punkcie  $b$ , a zasilanego z obu krańców  $a_1$  i  $a_2$ . Punkt  $b$  jest punktem spływu prądów  $I_1$  i  $I_2$ . Rysujemy wykres wektorowy dla odcinka  $a_1 b$ :



Rys. 123.

$$\overline{oc} = E_b; \quad \overline{of} = I_1; \quad \overline{ce} \parallel \overline{of}; \quad \overline{ce} = I_1 R_1; \quad \overline{oe} = E_1.$$

Rozkładamy prąd  $I_1$  na składniki:

watowy ....  $I_1 \cos \varphi$ , bezwatowy ....  $I_1 \sin \varphi$ ,

a także rozkładamy stratę napięcia  $\overline{ce} = I_1 R_1$  na składniki:

watowy ....  $\overline{cd} = (I_1 \cos \varphi) R_1$ , bezwatowy ....  $\overline{de} = (I_1 \sin \varphi) R_1$ .

Łatwo sprawdzić, że wykres napięć, zbudowany dla odcinka  $a_1 b$ , jest jednocześnie wykresem dla odcinka  $a_2 b$ . W punkcie  $b$  może być tylko jedno napięcie ....  $\overline{oc} = E_b$ . Zgodnie z założeniem, wszystkie punkty zasilające mają napięcia jednakowe, a więc  $\overline{oe} = E_1 = E_2$ . Wobec tego, straty napięcia są jednakowe:  $\overline{ce} = I_1 R_1 = I_2 R_2$ , jednakowe są składniki watowe tych strat i jednakowe składniki bezwatowe:

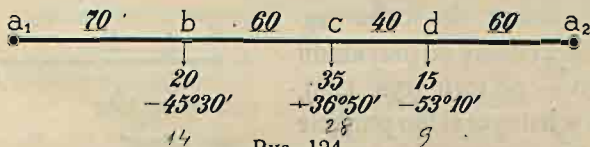
$$(I_1 \cos \varphi) R_1 = (I_2 \cos \varphi) R_2 \quad (I_1 \sin \varphi) R_1 = (I_2 \sin \varphi) R_2. \quad (a)$$

Gdyby tor  $a_1 a_2$  był obciążony w wielu punktach, to rozumując, jak wyżej, doszlibyśmy do równań ogólniejszych. Okazałoby się, że suma iloczynów prądów watowych przez oporności z jednej strony punktu spływu musi się równać sumie iloczynów z drugiej strony tego punktu. To samo tyczy się prądów bezwatowych.

Stąd wypływa prawo ogólne.

*Chcąc ustalić rozptył prądów w torach zamkniętych, rozkładamy prądy odbierane na watowe i bezwatowe. Obliczamy rozptył prądów osobno watowych i osobno bezwatowych (przez zrównywanie momentów tak, jak przy prądzie stałym § 8). Wreszcie dodajemy geometrycznie znalezione prądy przewodowe: watowe i bezwatowe.*

*Przykład 52. Ustalić prądy i kąty przesuwu w torze zamkniętym (rys. 124) o przekroju jednostajnym, obciążonym w punktach  $b, c, d$  temi samymi prądami, co w przykładzie 50 i 51.*



Rys. 124

Rozkładamy prądy na watowe i bezwatowe. Obliczamy rozptył prądów watowych (rys. 125-I) i bezwatowych (rys. 125-II). Watowe prądy zasilania wynoszą:

$$i_1^w = \frac{9 \cdot 60 + 28 \cdot 100 + 14 \cdot 160}{230} = 24,26 \text{ A}$$

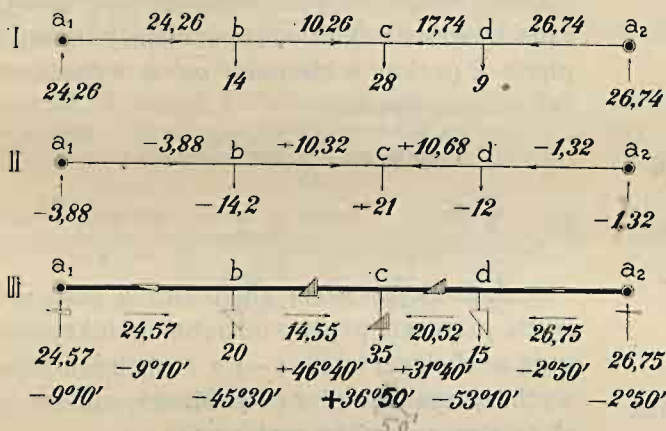
$$i_2^w = \frac{14,70 + 28,130 + 9,170}{230} = 26,74 \text{ A},$$

a bezwątowe:

$$i_1^b = \frac{-12,60 + 21,100 - 14,2,160}{230} = -3,88 \text{ A}$$

$$i_2^b = \frac{-14,2,70 + 21,130 - 12,170}{230} = -1,32 \text{ A}.$$

Po ustaleniu kierunku przewodowych prądów wátowych (rys. 125-I), stawiamy na planie prądów bezwátowych (rys. 125-II) strzałki o tych samych kierunkach, co dla prądów wátowych, i zapomocą znaków + i - uzgadniamy z I-em prawem Kirchhoffa.



Rys. 125.

Dodając prądy wátowe i bezwátowe geometrycznie, otrzymujemy (rys. 125-III) prądy rzeczywiste:

$$i_1 = \sqrt{24,26^2 + (-3,88)^2} = 24,57 \text{ A}, \quad i_2 = \sqrt{26,74^2 + (-1,32)^2} = 26,75 \text{ A}.$$

Dla całości obrazu obliczamy jeszcze sumaryczny prąd zasilania:

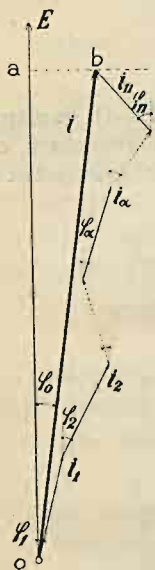
$$i = \sqrt{(24,26 + 26,74)^2 + (-3,88 - 1,32)^2} = 51,3 \text{ A}$$

I wypadkowy kąt przesuwu:

$$\varphi = \arctg \frac{-3,88 - 1,32}{24,26 + 26,74} = -5^\circ 50' \quad (\text{porównaj przykł. 51}).$$

W wielu przypadkach i ten sposób jest zbyt złożony. Rozkładanie prądów, dwukrotne obliczanie rozptywu, składanie prądów zpowrotem — wszystko to wymaga wielkiego nakładu pracy. Gdy chodzi o wyznaczenie przekrojów, niepotrzebna jest taka dokładność. Kąty przesuwu

wahają się nieraz w tak ciasnych granicach, że nasuwa się myśl sprowadzenia wszystkich odbiorów do jednostajnego (jakby „średniego“) kąta przesuwu. Zaoszczędziłoby to wiele pracy.



Rys. 126.

Takim jednostajnym kątem dla szeregu odbiorów będzie wypadkowy kąt przesuwu dla tych odbiorów. Obliczmygo. Wyobraźmy sobie tor zamknięty (albo całą sieć rozsyłową), obciążony w  $n$  punktach prądami: 1)  $i_1$ , opóźniającym się o kąt  $\varphi_1$ , 2)  $i_2$  — kąt  $\varphi_2 \dots \alpha$ )  $i_\alpha$  — kąt  $\varphi_\alpha \dots n$ )  $i_n$  — wyprzedzającym o kąt  $\varphi_n$ . Dajmy te prądy geometrycznie (rys. 126), a otrzymamy prąd wypadkowy  $i$  (na wykresie wektor  $ob$ ), opóźniający się względem napięcia  $E$  (wektor w kierunku  $oa$ ) o wypadkowy kąt  $\varphi_0$ . Jak widać z wykresu:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_0 &= \frac{ab}{ao} = \\ &= \frac{-i_1 \sin \varphi_1 - i_2 \sin \varphi_2 \dots - i_\alpha \sin \varphi_\alpha \dots + i_n \sin \varphi_n}{i_1 \cos \varphi_1 + i_2 \cos \varphi_2 \dots + i_\alpha \cos \varphi_\alpha \dots + i_n \cos \varphi_n} \end{aligned}$$

Licznik jest sumą algebraiczną prądów bezwatuowych, przyczem prądy z obciążeń indukcyjnych występują ze znakiem minus (—), a z obciążeń pojemnościowych ze znakiem plus (+). Mianownik zaś jest sumą arytmetyczną prądów watowych.

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{\sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} \pm i_\alpha \sin \varphi_\alpha}{\sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} i_\alpha \cos \varphi_\alpha} \quad \begin{array}{l} (+ \text{ obciąż. pojemnościowe,} \\ - \text{ obciąż. indukcyjne.} \end{array} \quad (b)$$

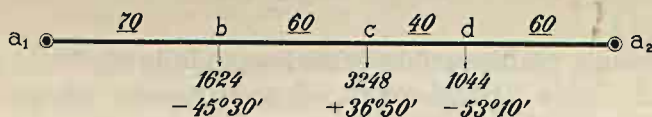
W punktach odbiorczych panują różne napięcia. Nie popełnimy jednak wielkiego błędu, przyjmując dla wszystkich odbiorów, zamiast napięć różnych, pewne jednostajne napięcie średnie  $E_{sr}$ . Oznaczmy przez  $p_1, p_2 \dots p_\alpha \dots p_n$  moce odbiorów w punktach 1, 2  $\dots \alpha \dots n$ , wyrażone w watach. Pomnożywszy licznik i mianownik wzoru (b) przez napięcie średnie  $E_{sr}$ , otrzymamy:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_0 &= \frac{\sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} \pm E_{sr} i_\alpha \sin \varphi_\alpha}{\sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} E_{sr} i_\alpha \cos \varphi_\alpha} = \frac{\sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} \pm (E_{sr} i_\alpha \cos \varphi_\alpha) \frac{\sin \varphi_\alpha}{\cos \varphi_\alpha}}{\sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} (E_{sr} i_\alpha \cos \varphi_\alpha)} = \\ &= \frac{\pm p_1 \operatorname{tg} \varphi_1 \pm \dots \pm p_\alpha \operatorname{tg} \varphi_\alpha \pm \dots \pm p_n \operatorname{tg} \varphi_n}{p_1 + \dots + p_\alpha + \dots + p_n} \end{aligned}$$

$$\left| \begin{array}{c} \sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} \pm p_{\alpha} \operatorname{tg} \varphi_{\alpha} \\ \sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} p_{\alpha} \end{array} \right| \quad \begin{array}{l} (+ \text{ obciąż. pojemnościowe;} \\ - \text{ obciąż. indukcyjne).} \end{array} \quad (85)$$

Zastosowanie tego wzoru nie przedstawia trudności, gdyż odbiory prądu podawane są zwykle w liczbach watów. Praktycy częstokroć upraszczają sobie rachunek i obliczają cały rozptył prądów w watach. Ze stanowiska teoretycznego jest to postępowanie błędne, gdyż nie uwzględnia spadku napięcia i straty mocy. Można jednak częściowo naprawić zło i po ukończeniu rachunku powiększyć liczby doprowadzonych mocy, mnożąc je przez stosunek napięcia punktów zasilających do napięcia średniego u odbiorników.

*Przykład 53.* Na rys. 127 odbiory podane są w watach. Obliczyć sposobem przybliżonym moce prądów zasilających. Przekrój jednostajny. Napięcie w punktach zasilających 120 V, a średnie napięcie u odbiorników 116 V.



Rys. 127.

Obliczamy przybliżoną moc prądów zasilających:

$$p_1' = \frac{1044 \cdot 60 + 3248 \cdot 100 + 1624 \cdot 160}{230} = 2814 \text{ W},$$

$$p_2' = \frac{1624 \cdot 70 + 3248 \cdot 130 + 1044 \cdot 170}{230} = 3102 \text{ W}.$$

Chcąc uwzględnić stratę mocy w przewodach, mnożymy znalezione liczby przez stosunek napięć:

$$p_1 = 2814 \cdot \frac{120}{116} = 2910 \text{ W}, \quad p_2 = 3210 \text{ W}.$$

Zadanie jest już rozwiązane. Przy powyższem obliczaniu przyjęliśmy jednostajny kąt przesuwu. Kąt ten wynosi wg wzoru (85):

$$\varphi_0 = \arctg \frac{-1624 \operatorname{tg} 45^\circ 30' + 3248 \operatorname{tg} 36^\circ 50' - 1044 \operatorname{tg} 53^\circ 10'}{1624 + 3248 + 1044} = -5^\circ 50'.$$

Znając wartość tego kąta, możemy obliczyć prądy zasilania w amperach:

$$i_1 = \frac{2814}{116 \cos 5^\circ 50'} = 24,4 \text{ A}, \quad i_2 = \frac{3102}{116 \cos 5^\circ 50'} = 26,9 \text{ A}.$$

Ścisłe obliczenie (przykład 52) dało niemal takie same wyniki:

$$i_1 = 24,57 \text{ A}; \quad i_2 = 26,75 \text{ A}.$$

Obie powyższe metody możemy zastosować do sieci zamkniętych. Wg metody ściślejszej należy przedewszystkiem prądy odbierane rozłożyć na składniki wátowe i bezwátowe, następnie opracować rozplyw prądów osobno wátowych, a osobno bezwátowych, wreszcie znalezione prądy przewodowe dodać ze sobą geometrycznie. Równania dla sieci prądów wátowych będą zupełnie zgodne ze wzorem (29):

$$\underbrace{\overline{\Delta E}_t^w \sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} G_{u_\alpha}}_{\text{wyrównawcze}} - \underbrace{\sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} \overline{\Delta E}_{t_\alpha}^w G_{u_\alpha}}_{\text{składowe}} - \underbrace{\sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} (i'_\alpha)^w}_{\text{odbiór}} - i_t^w = 0,$$

przyczem  $\overline{\Delta E}_t^w$ ,  $\overline{\Delta E}_{t_1}^w \dots \overline{\Delta E}_{t_\alpha}^w \dots \overline{\Delta E}_{t_n}^w$  będą teraz oznaczały składniki wátowe strat napięcia,  $(i'_1)^w \dots (i'_\alpha)^w \dots (i'_n)^w$  — prądy składowe, obliczone z prądów wátowych, a  $i_t^w$  — składnik wátowy prądu, odbieranego z punktu węzłowego  $t$ .

Równania zaś dla prądów bezwátowych będą musiały uwzględniać zwrot tych prądów (opóźnianie się lub wyprzedzanie napięcia), a więc w ogólnej formie wyrażą się wzorem następującym (por. ze wzorem 84):

$$\left[ \underbrace{\overline{\Delta E}^b \sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} G_{u_\alpha}}_{\text{wyrównawcze}} - \underbrace{\sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} \overline{\Delta E}_{t_\alpha}^b G_{u_\alpha}}_{\text{składowe}} - \underbrace{\sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} \pm (i'_\alpha)^b}_{\text{odbiór}} - (\pm i_t^b) = 0 \right] \begin{matrix} (+ \text{ wyprzedzanie,} \\ - \text{ opóźnianie,} \end{matrix} \quad (86)$$

przyczem  $\overline{\Delta E}_t^b$ ,  $\overline{\Delta E}_{t_1}^b \dots \overline{\Delta E}_{t_\alpha}^b \dots \overline{\Delta E}_{t_n}^b$  będą oznaczały składniki bezwátowe strat napięcia,  $(i'_1)^b \dots (i'_\alpha)^b \dots (i'_n)^b$  — prądy składowe, obliczone z prądów bezwátowych,  $i_t^b$  składnik bezwátowy prądu, odbieranego z punktu węzłowego  $t$ .

Rozwiązywanie wykreślne równań wzoru (86) będzie takie samo, jak równań (84) — p. rys. 116.

Posiłkując się metodą mniej ścisłą, będziemy operowali liczbami wátów tak, jak gdyby to były liczby amperów, a równania ułożymy wg wzoru (29). Obliczone moce zasilania należy skorygować, mnożąc je przez stosunek napięcia zasilania do napięcia średniego. Wypadkowy kąt przesuwu fazy znajdziemy wg wzoru (85), a prądy w amperach otrzymamy, dzieląc liczby wátów przez średnie napięcie u odbiorników  $E_{sr}$  i przez cosinus kąta wypadkowego ....  $\cos \varphi_0$  (por. przykł. 53).

## § 41. Spadek i strata napięcia, strata mocy.

Wróćmy do toru otwartego  $az$  (rys. 128), obciążonego tylko w jednym punkcie, na krańcu  $z$  prądem  $i$ . Na wykresie wektorowym:  $\overline{ob} = E_z$ ,  $\overline{of} = i$ ,  $\overline{bc} = i \cdot R$ ,  $\overline{oc} = E_a$ . Iloczyn prądu przez oporność toru nazywamy stratą napięcia i oznaczamy przez  $\Delta E_{az}$  (wektor  $\overline{bc}$ ):

$$\overline{\Delta E_{az}} = i R. \quad (87)$$

Przyprostokątne są składnikami straty napięcia: watomym ( $\overline{bd}$ ) i bezwatomym ( $\overline{dc}$ ). Chcąc znaleźć różnicę napięć między początkiem a końcem toru, zataczamy z punktu  $o$  łuk  $ce$  promieniem  $oc$  i znajdujemy odcinek:

$$\overline{be} = E_a - E_z.$$

Znalezioną różnicę będziemy nazywali nadal tak, jak w prądach stałych; — spadkiem napięcia.

*Strata napięcia jest geometryczną różnicą napięć, spadek — różnicą algebraiczną,*

Jak widać z rys. 128, różnica między spadkiem napięcia ( $\overline{be}$ ) a składnikiem watomym straty napięcia ( $\overline{bd}$ ) wyraża się długością strzałki  $\overline{de}$ . Różnica ta w stosunku do napięcia zasilania ( $\overline{oe}$ ) jest nieznaczna. Im mniejszy jest stosunek spadku napięcia ( $\overline{be}$ ) do napięcia ( $\overline{oe}$ ), tem mniejsza jest różnica  $\overline{de}$ . W praktyce spadek napięcia rzadko kiedy przekracza 5% (na rys. 128 wynosi około 50%), a więc odcinek  $\overline{de}$  zawsze wypada znikomo mały. Nie popełnimy zatem wielkiego błędu, przyjmując, że spadek napięcia równa się składnikowi watomemu straty napięcia:

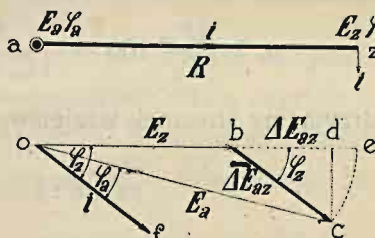
$$\Delta E_{az} \approx \overline{\Delta E_{az}} \cos \varphi_s = i R \cos \varphi_s. \quad (88)$$

Dla torów prądu zmiennego obliczamy nieraz stratę mocy  $\Delta P_{az}$ , która wyraża się wzorem:

$$\Delta P_{az} = i^2 R. \quad (89)$$

Porównajmy procentową stratę napięcia  $p_v$  dla toru, obciążonego w jednym tylko punkcie:

$$p_v = \frac{\overline{\Delta E_{az}}}{E_a} 100 = \frac{i R}{E_a} 100$$



Rys. 128.

z procentowym spadkiem napięcia  $p_v$ :

$$p_v = \frac{\Delta E_{as}}{E_a} 100 = \frac{i R \cos \varphi_s}{E_a} 100$$

i z procentową stratą mocy:

$$p_w = \frac{\Delta P_{az}}{P_a} 100 = \frac{i^2 R}{i E_a \cos \varphi_a} 100 = \frac{i R}{E_a \cos \varphi_a} 100,$$

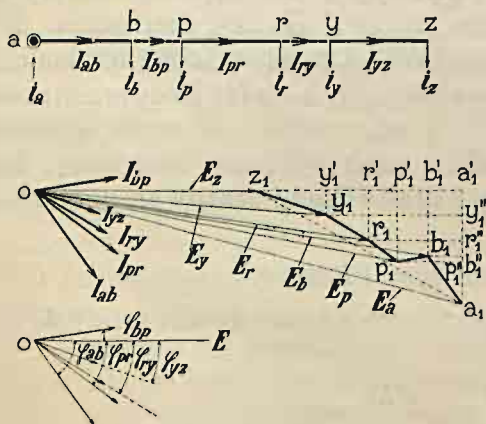
a otrzymamy stosunek wzajemny:

$$\overline{p_v} : p_v : p_w = 1 : \cos \varphi_s : \frac{1}{\cos \varphi_a}. \quad (90)$$

A więc dla toru, obciążonego w jednym tylko punkcie, największą jest liczba procentowej straty mocy  $p_w$ , następnie idzie liczba procentowej straty napięcia  $\overline{p_v}$ , a najmniejszą jest liczba procentowego spadku napięcia  $p_v$ . Przy obciążeniu opornościowym (bezindukcyjnym)  $\cos \varphi_s = \cos \varphi_a = 1$ , a wszystkie liczby procentowe  $\overline{p_v}$ ,  $p_v$ ,  $p_w$  wypadną jednakowe:

$$\overline{p_v} = p_v = p_w.$$

Przechodzimy do torów, obciążonych w kilku punktach (rys. 129). Wykres prądów i napięć zbudowaliśmy w ten sposób, jak na rys. 121. Do napięcia na krańcu  $E_z = \overline{oz}_1$  dodano geometrycznie straty napięcia:



Rys. 129.

$$\Delta E_{yz} = I_{yz} R_{yz} = \overline{z_1 y_1}$$

$$\Delta E_{ry} = I_{ry} R_{ry} = \overline{y_1 r_1}$$

$$\Delta E_{pr} = I_{pr} R_{pr} = \overline{r_1 p_1}$$

$$\Delta E_{bp} = I_{bp} R_{bp} = \overline{p_1 b_1}$$

$$\Delta E_{ab} = I_{ab} R_{ab} = \overline{b_1 a_1}$$

i otrzymano napięcie zasilania  $E_a = \overline{oa_1}$ . Na rys. 129 stosunek strat napięcia do napięcia roboczego jest nadmierny. Wrzeczywistości, stosunek ten, jak mówiliśmy wyżej, rzadko

kiedy przekracza 5%, a wektory napięcia na początku i na końcu toru tak niewiele odchylają się od siebie (patrz rys. 121), że można przyjąć dla

nich kierunek jednakowy. Wróćmy do rys. 129 i wyobraźmy sobie, że ośrodek  $o$  został znacznie cofnięty w stronę lewą, przez co wektory napięć  $E_z, E_y, E_r, E_p, E_b$  i  $E_a$  przybrały kierunek poziomy. Kąty przesuwu prądów przewodowych  $I_{ab}, I_{bp}, I_{pr}, I_{ry}, I_{yz}$  względem wspólnego (poziomego) kierunku wszystkich napięć oznaczyliśmy (patrz rys.) literami:  $\varphi_{ab}, \varphi_{bp}, \varphi_{pr}, \varphi_{ry}, \varphi_{yz}$ .

Linja łamana  $z_1 y_1 r_1 p_1 b_1 a_1$  ilustruje straty napięcia wszystkich odcinków toru, cięciwa tej linii  $\overline{z_1 a_1}$  jest wypadkową stratą napięcia całego toru ...  $\overline{\Delta E_{az}}$ , rzut poziomy tej cięciwy ...  $\overline{z_1 a_1'}$  jest składnikiem watowym straty napięcia, a rzut pionowy  $\overline{a_1' a_1}$  — składnikiem bezwatowym.

Jak widać z rysunku, składnik watowy straty napięcia  $\overline{\Delta E_{az}^w}$  równa się sumie:

$$\begin{aligned} \overline{z_1 a_1'} &= \overline{z_1 y_1'} + \overline{y_1' r_1'} + \overline{r_1' p_1'} + \overline{p_1' b_1'} + \overline{b_1' a_1'} = \overline{z_1 y_1} \cos \varphi_{yz} + \\ &+ \overline{y_1 r_1} \cos \varphi_{ry} + \overline{r_1 p_1} \cos \varphi_{pr} + \overline{p_1 b_1} \cos \varphi_{bp} + \overline{b_1 a_1} \cos \varphi_{ab} = \\ &= I_{yz} R_{yz} \cos \varphi_{yz} + I_{ry} R_{ry} \cos \varphi_{ry} + I_{pr} R_{pr} \cos \varphi_{pr} + I_{bp} R_{bp} \cos \varphi_{bp} + \\ &+ I_{ab} R_{ab} \cos \varphi_{ab}, \end{aligned}$$

a ogólnie:

$$\overline{\Delta E_{az}^w} = \sum_a^z (I_{pr} \cos \varphi_{pr}) R_{pr}. \quad (a)$$

Składnik bezwatowy  $\overline{\Delta E_{az}^b}$  równa się sumie:

$$\overline{a_1' a_1} = \overline{a_1' y_1''} + \overline{y_1'' r_1''} + \overline{r_1'' p_1''} - \overline{p_1'' b_1''} + \overline{b_1'' a_1},$$

a ogólnie:

$$\overline{\Delta E_{az}^b} = \sum_a^z (\pm I_{pr} \sin \varphi_{pr}) R_{pr} \quad \begin{array}{l} (+ \text{ gdy prąd wyprzedza;} \\ - \text{ gdy prąd opóźnia się.} \end{array} \quad (b)$$

We wzorach (a) i (b) iloczyny  $(I_{pr} \cos \varphi_{pr})$  są prądami watowymi, a  $(I_{pr} \sin \varphi_{pr})$  — prądami bezwatowymi.

*Watowy składnik straty napięcia równa się sumie iloczynów prądów watowych przez oporności, a bezwatowy składnik — sumie iloczynów prądów bezwatowych przez oporności.*

Prądy watowe są wszystkie w jednej fazie, a więc dodają się algebraicznie, jak prądy stałe. To samo tyczy się i prądów bezwatowych. Stąd wniosek, że wzory (a) i (b) możemy przekształcić tak, jak w § 3 przekształciliśmy wzór (5) na wzór (6), zastępując prądy przewodowe—

prądami zasilania i odbioru, a sumowanie odcinkami — sumowaniem momentami.

Składnik watowy straty napięcia równa się (rys. 129):

$$\overline{\Delta E_{as}^w} = (i_a \cos \varphi_a) R_{as} - (i_b \cos \varphi_b) R_{bs} - (i_p \cos \varphi_p) R_{ps} - (i_r \cos \varphi_r) R_{rs} - \\ - (i_y \cos \varphi_y) R_{ys} = \sum_a^s \pm (i_p \cos \varphi_p) R_{ps}, \quad (c)$$

a składnik bezwatowy ( $i_a, i_b, i_r, i_y$  — induk.;  $i_p$  — pojemn.):

$$\overline{\Delta E_{as}^b} = (-i_a \sin \varphi_a) R_{as} - (-i_b \sin \varphi_b) R_{bs} - (+i_p \sin \varphi_p) R_{ps} - \\ - (-i_r \sin \varphi_r) R_{rs} - (-i_y \sin \varphi_y) R_{ys} = \sum_a^s \pm (\pm i_p \sin \varphi_p) R_{ps}. \quad (d)$$

Z trójkąta prostokątnego  $z_1 a_1' a_1$  znajdziemy wypadkową stratę napięcia ( $z_1 a_1$ ), czyli geometryczną różnicę napięć:

$$\overline{\Delta E_{az}} = \sqrt{\left[ \sum_a^s \pm (i_p \cos \varphi_p) R_{ps} \right]^2 + \left[ \sum_a^s \pm (\pm i_p \sin \varphi_p) R_{ps} \right]^2} \\ \text{(sumowanie momentami; } \\ + \text{ zasilanie, } - \text{ odbiór; } \\ + \text{ wyprzedzanie, } - \text{ opóźn.).} \quad (91)$$

Spadek napięcia, czyli algebraiczną różnicę napięć, możemy z dostateczną dokładnością zrównać z watowym składnikiem straty napięcia:

$$\left| \Delta E_{az} \approx \sum_a^s \pm (i_p \cos \varphi_p) R_{ps} \right| \quad \text{(sumowanie momentami; } \\ + \text{ zasilanie, } - \text{ odbiór).} \quad (92)$$

*Spadek napięcia w prądach zmiennych oblicza się tak, jak w prądach stałych (wzory 5 i 6), lecz zamiast prądów rzeczywistych, uwzględnia się składniki watowe.*

W prądach stałych moc prądu odbieranego równa się iloczynowi napięcia przez prąd ...  $p = Ei$ , a w prądach zmiennych — iloczynowi napięcia przez prąd i przez współczynnik mocy ...  $p = Ei \cos \varphi$ . Stąd wniosek, że spadki napięcia przy jednakowych mocach odbioru  $p_p$  wypadają jednakowe dla prądu stałego i zmiennego.

Wreszcie strata mocy wyniesie:

$$\Delta P_{az} = I_{ab}^2 R_{ab} + I_{bp}^2 R_{bp} + I_{pr}^2 R_{pr} + I_{ry}^2 R_{ry} + I_{yz}^2 R_{yz},$$

czyli ogólnie:

$$\left[ \Delta P_{az} = \sum_a^s I_{pr}^2 R_{pr} \right] \quad (\text{sumowanie odcinkami}). \quad (93)$$

Gdy tor na całej swej długości będzie miał jednakowy przekrój  $s$ , wówczas wyprowadzimy przed nawias  $\frac{2}{k s}$ , a sumować będziemy iloczyny prądów w drugiej potęgze przez długości odcinków toru  $l$ .

*Przykład 54.* Tor ten sam, co w przykładach 50-ym i 51-ym. Obliczyć procentową stratę napięcia, procentowy spadek napięcia i procentową stratę mocy. Napięcie zasilania .... 120 V.

$$E_a = 120 \text{ V}; \quad k = 57 \frac{\text{m}}{\Omega \text{ mm}^2}; \quad s = 16 \text{ mm}^2; \quad l_{ab} = 70 \text{ m}; \quad l_{be} = 10 \text{ m}; \quad l_{cz} = 40 \text{ m}.$$

Obliczamy watowy składnik straty napięcia z rys. 122-I wg wzoru (c):

$$\overline{\Delta E_{az}^w} = \frac{2}{57 \cdot 16} [51 \cdot 170 - 14 \cdot 100 - 28 \cdot 40] = 13,49 \text{ V},$$

a bezwatowy składnik wg wzoru (d) z rys. 122-II:

$$\overline{\Delta E_{az}^b} = \frac{2}{57 \cdot 16} [(-5,2) \cdot 170 - (-14,2) \cdot 100 - (+21) \cdot 40] = -0,67 \text{ V}.$$

Spadek napięcia w przybliżeniu równa się watowemu składnikowi straty napięcia:

$$\Delta E_{az} \approx 13,49 \text{ V},$$

strata napięcia wg wzoru (91) równa się:

$$\overline{\Delta E_{az}} = \sqrt{13,49^2 + (-0,67)^2} = 13,50 \text{ V},$$

a strata mocy wg wzoru (93) — z rys. 122-III:

$$\Delta P_{az} = \frac{2}{57 \cdot 16} (51,3^2 \cdot 70 + 38,1^2 \cdot 60 + 15^2 \cdot 40) = 614,7 \text{ W}.$$

Moc prądu zasilania wynosi:

$$P_a = 51,3 \cdot 120 \cdot \cos 5^\circ 50' = 6124 \text{ W},$$

procentowa strata napięcia:

$$\overline{p_v} = \frac{13,50}{120} \cdot 100 = 11,25\%,$$

procentowy spadek napięcia:

$$p_v = \frac{13,49}{120} \cdot 100 \approx 11,25\%$$

a procentowa strata mocy:

$$p_w = \frac{614,7}{6124} = 10,04\%.$$

Gdyby tor był obciążony z jednostajnym przesuwem  $\varphi$ , wówczas wzory (91) i (92) przybrałyby jeszcze prostszą formę:

$$\overline{\Delta E_{az}} = \sum_a^z \pm i_p R_{pz} \qquad \Delta E'_{az} = \cos \varphi \sum_a^z \pm i_p R_{pz}.$$

## § 42. Obliczanie przekroju.

*Obliczanie na przekrój jednostajny i na dopuszczalny spadek napięcia.* Największy spadek napięcia na krańcu toru  $\Delta E_{\max}$  wyniesie wg wzoru (92):

$$\Delta E_{\max} = \Delta E_{az} \approx \frac{2}{k s} \sum_a^z \pm (i_p \cos \varphi_p) l_{pz} = \Delta E_{dav}.$$

Stąd otrzymamy przekrój  $s$ :

$$\left| s \approx \frac{2}{k \Delta E_{dav}} \sum_a^z \pm (i_p \cos \varphi_p) l_{pz} \right| \quad \begin{array}{l} \text{(sumowanie momentami;} \\ \text{+ zasilanie; - odbiór)} \end{array} \quad (94)$$

Różnica w porównaniu ze wzorem prądu stałego (39) polega tylko na tem, że zamiast prądów rzeczywistych  $i_p$ , wchodzi składniki watowe tych prądów ...  $i_p \cos \varphi_p$ .

Przy jednakowych mocach odbioru przekroje, obliczone na spadek napięcia, wypadają jednakowe dla prądu stałego i zmiennego.

*Przykład 55.* Tor zamknięty ten sam, co w przykładzie 52-im (rys. 124). Obliczyć przekrój jednostajny na 5% dopuszczalnego spadku napięcia, czyli na 6 V.

Kierujemy się rozpięciem prądów watowych (rys. 125-1). Punktem największego spadku napięcia będzie punkt sływu prądów ... c. Momenty prądów liczymy względem tego punktu bądź od strony punktu zasilającego  $a_1$ , bądź od strony przeciwniej:

$$s = \frac{2}{57,6} (24,26 \cdot 130 - 14 \cdot 60) = 13,5 \approx 16 \text{ mm}^2.$$

Obliczanie przekroju na spadek napięcia ma na celu utrzymanie napięcia roboczego na pewnej wysokości. Głównie chodzi o instalacje oświetleniowe, gdyż wahanie światła zależy w wielkim stopniu od spadku napięcia (§ 2). Obliczanie na stratę napięcia nie miałyby żadnego uzasadnienia, gdyż „strata” jest pojęciem czysto teoretycznym. Wszystkie praktyczne przejawy prądu: światłość lamp, praca silników i t. d., a także wskazania woltomierzy zależą nie od geometrycznej, lecz od algebraicznej różnicy napięć.

Natomiast, obliczanie przekroju na dopuszczalną stratę mocy ma pewne podstawy natury ekonomicznej. Przesyłając energję na odległość, staramy się zużytkować pożytecznie jak największy odsetek tej energii. W tym celu możemy wyznaczyć pewną dopuszczalną procentową stawkę straty mocy i do tych wymagań dostosować przewody.

*Obliczanie toru na przekrój jednostajny i na dopuszczalną stratę mocy.* Największa strata mocy  $\Delta P_{\max}$  wyniesie wg wzoru (93):

$$\Delta P_{\max} = \Delta P_{as} = \frac{2}{k s} \sum_a^z I_{pr}^2 l_{pr} = \Delta P_{dziw}.$$

Stąd otrzymamy przekrój  $s$ :

$$s = \frac{2}{k \Delta P_{dziw}} \sum_a^z I_{pr}^2 l_{pr} \quad (\text{sumowanie odcinkami}). \quad (95)$$

Sumowanie iloczynów odcinkami zastępowaliśmy już kilka razy sumowaniem momentami. W obecnym wzorze, gdzie prąd przewodowy  $I_{pr}$  występuje w potęgze drugiej, zmiany takiej nie da się wykonać. Sumowanie momentami drugiej potęgi przyłożonych prądów przez długości ramion ( $\pm i_p^2 l_{pr}$ ) byłoby błędem.

*Przykład 56.* Tor zamknięty ten sam, co w przykładzie 53-im (rys. 127). Obliczyć przekrój jednostajny na 5% dopuszczalnej straty mocy.

W przykładzie 53-im ustalono przybliżony rozptyw prądów, wyrażonych w watach. Zamiast natężenia prądów przewodowych, mamy moce tych prądów. Są to iloczyny liczby amperów przez średnie napięcie u odbiorników .... 116 V i przez wypadkowy współczynnik mocy ....  $\cos 50^\circ$ .

W odcinku (p. rys. 127)  $a_1 b$   $b c$   $c d$   $d a_2$   
moc prądu przewodowego wynosi: 2814 W 1190 W 2058 W 3102 W.

Moc odbierana wynosi w sumie:

$$P_{\Sigma} = 1624 + 3248 + 1044 = 5916 \text{ W}.$$

Dopuszczalna strata mocy  $\Delta P_{dziw}$  ma wynosić 5% całej mocy doprowadzonej: *(mocy  $P_{\Sigma}$ )*

$$\Delta P_{dziw} = \frac{5916 \cdot 5}{100} = 311 \text{ W}.$$

Do obliczenia przekroju  $s$  zastosujemy wzór (95) z tą tylko zmianą, że zamiast prądów  $I_{pr}$ , podstawimy moce  $P_{pr}$ , a dzielenie liczby watów przez napięcie 116 V i przez współczynnik mocy  $\cos 50^{\circ}50'$  wykonamy przez wyprowadzenie wspólnego dzielnika przed nawias:

$$s = \frac{2}{57 \cdot 311 \cdot 116^2 \cdot \cos^2 50^{\circ}50'} (2814^2 \cdot 70 + 1190^2 \cdot 60 + 2058^2 \cdot 40 + 3102^2 \cdot 60) = 11,8 \approx 10 \text{ mm}^2.$$

*Obliczanie na najmniejszą objętość rzeczywistą lub przybliżoną i na dopuszczalny spadek napięcia.* Wzory od (43) do (55), wyprowadzone dla prądu stałego, będą ważne dla prądu zmiennego z tą jedynie zmianą, że, zamiast prądów rzeczywistych:  $I_0, I_1 \dots I_a \dots I_n$ , wejdą składniki watowe tych prądów:  $I_0 \cos \varphi_0, I_1 \cos \varphi_1 \dots I_a \cos \varphi_a \dots I_n \cos \varphi_n$ . A zatem, przekroje toru nierozgałęzionego będzie można obliczyć bądź zapomocą wzoru (por. wzór 45):

$$s_1 : s_2 : \dots : s_a : \dots : s_n = \sqrt{I_1 \cos \varphi_1} : \sqrt{I_2 \cos \varphi_2} : \dots : \sqrt{I_a \cos \varphi_a} : \dots : \sqrt{I_n \cos \varphi_n}, \quad (96)$$

bądź przez obliczanie długości odcinka umyślnego (por. wzór 47):

$$\lambda_\beta = \sqrt{\frac{(I_\beta \cos \varphi_\beta) l_\beta^2}{I_a \cos \varphi_a}}. \quad (97)$$

Długość odcinka umyślnego dla kilku gałęzi, obliczanych na ściśle minimum objętości, znajdziemy ze wzoru (por. wzór 52):

$$\lambda = \sqrt{\frac{\sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} (I_\alpha \cos \varphi_\alpha) l_\alpha^2}{\sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} I_\alpha \cos \varphi_\alpha}}, \quad (98)$$

a na przybliżone minimum objętości, czyli na stałą sumę przekrojów (por. wzór 54):

$$\lambda = \sqrt{\frac{\sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} (I_\alpha \cos \varphi_\alpha) l_\alpha}{\sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} I_\alpha \cos \varphi_\alpha}}. \quad (99)$$

Przy jednakowych mocach odbioru przekroje dla prądu zmiennego wypadną takie same, jak dla prądu stałego.

*Przykład 57.* Tor zamknięty ten sam, co w przykładzie 53-im i 56-ym (rys. 127). Napięcie średnie u odbiorników 116 V. Obliczyć przekroje na minimum objętości i na 5% dopuszczalnego spadku napięcia t. j. na 6 V.

Za podstawę obliczeń bierzemy rozptyw prądów, obliczony sposobem przybliżonym dla jednostajnego przekroju (przykład 53-ci). Punkt spływu  $c$  dzieli tor na dwie części. Zaczynamy od lewej części toru  $a_1c$ . Zgodnie ze wzorem (96) stosunek przekrojów powinien się równać stosunkowi pierwiastków z prądów watowych. Przy równym napięciu stosunek prądów watowych jest taki sam, jak stosunek liczby watów, a więc

$$s_{a,b} : s_{bc} = \sqrt{2814} : \sqrt{1190} = 53 : 34,5.$$

Gdyby przekroje były następujące:  $s_{a,b} = 53 \text{ mm}^2$ ,  $s_{bc} = 34,5 \text{ mm}^2$ , spadek napięcia w punkcie  $c$  wyniósłby:

$$\Delta E_{a,c} = \frac{2}{57 \cdot 116} \left( \frac{2814 \cdot 70}{53} + \frac{1190 \cdot 60}{34,5} \right) = 1,75 \text{ V}.$$

Aby otrzymać spadek napięcia 6 V, zmniejszamy przekroje w stosunku spadków napięcia:

$$s_{a,b} = 53 \frac{1,75}{6} = 15,4 \approx 16 \text{ mm}^2,$$

$$\Delta E_{a,b} = \frac{2 \cdot 2814 \cdot 70}{57 \cdot 116 \cdot 16} = 3,7 \text{ V}.$$

$$\Delta E'_{dzw} = 6 - 3,7 = 2,3 \text{ V},$$

$$s_{bc} = \frac{2 \cdot 1190 \cdot 60}{57 \cdot 116 \cdot 2,3} = 9,4 \approx 10 \text{ mm}^2.$$

W ten sam sposób należałoby obliczyć przekroje dla drugiej części toru  $ca_2$ .

*Obliczanie na gospodarność.* Tory pojedyncze będzie się obliczało nadal wg tych samych wzorów (60) i (61), co przy prądzie stałym. Wielkość  $I$  będzie oznaczała nadal rzeczywisty prąd przewodowy (a nie składnik watowy!). Natomiast ulegnie zmianie wzór na gospodarczo najkorzystniejszy spadek napięcia dla kilku torów zasilających (65). Przy wyprowadzaniu tego wzoru opieramy się na kosztach przesyłania prądu. Koszta te w zależności od przekroju  $s$  wyrażą się tym samym wzorem (59), co poprzednio. Gdy jednak podstawimy:

$$s = \frac{2(I \cos \varphi_a) l_a}{k \Delta E},$$

ujawni się różnica. Koszta przesyłania prądu  $K$  wyrażą się wzorem (zamiast wzoru 64):

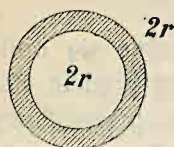
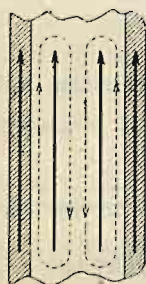
$$K = \frac{4 n_p^2}{k^2 \Delta E} \sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} (I_\alpha \cos \varphi_\alpha) l_\alpha^2 + \frac{p_v}{100} \left( 2c \sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} l_\alpha + n C \right) + \Delta E n_e^2 \sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} \frac{I_\alpha}{\cos \varphi_\alpha}. \quad (100)$$

Stąd otrzymamy wzór spadku napięcia gospodarczo najkorzystniejszego (zamiast wzoru 65), —

$$\Delta E_k = \frac{2 n_p}{k n_e} \sqrt{\frac{(I_1 \cos \varphi_1) l_1^2 + \dots + (I_\alpha \cos \varphi_\alpha) l_\alpha^2 + \dots + (I_n \cos \varphi_n) l_n^2}{\frac{I_1}{\cos \varphi_1} + \dots + \frac{I_\alpha}{\cos \varphi_\alpha} + \dots + \frac{I_n}{\cos \varphi_n}}} =$$

$$= \frac{2 n_p}{k n_e} \lambda$$

$$\left[ \Delta E_k = \frac{2 n_p}{k n_e} \lambda; \quad \lambda = \sqrt{\frac{\sum_{\alpha=1}^n (I_\alpha \cos \varphi_\alpha) l_\alpha^2}{\sum_{\alpha=1}^n \frac{I_\alpha}{\cos \varphi_\alpha}}} \right] \quad (101)$$



Rys. 130.

W prądach stałych długość umyślona  $\lambda$  przy obliczaniu na gospodarność wyrażała się tym samym wzorem (65), co długość umyślona przy obliczaniu na minimum objętości (52). W prądach zaś zmiennych długość umyślona, obliczana na minimum objętości, wyrażała się wzorem (98):

$$\lambda = \sqrt{\frac{\sum_{\alpha=1}^n (I_\alpha \cos \varphi_\alpha) l_\alpha^2}{\sum_{\alpha=1}^n I_\alpha \cos \varphi_\alpha}}$$

odmiennym, niż długość  $\lambda$  w obliczeniu gospodarczym (101).

*Obliczanie na nagrzewanie.* Nagrzewanie zależy od rzeczywistego prądu przewodowego (a nie od składnika watowego), to też obliczanie na nagrzewanie pozostanie takie, jak przy prądzie stałym bez żadnej zmiany (o pewnych różnicach pomówimy w paragrafie następnym i w rozdziale XI).

*Spadek napięcia zależy od składnika watowego, strata zaś mocy, gospodarność (w torach pojedynczych!) i temperatura nagrzania — od rzeczywistego prądu przewodowego.*

Przy jednakowej mocy odbieranej, jednakowej odległości od elektrowni i przy jednakowym napięciu otrzymamy dla prądu zmiennego większy prąd przewodowy (wskutek przesuwu fazy), niż dla prądu stałego. Wobec tego przekroje przewodów dla prądu zmiennego:

1) obliczone na stratę mocy, gospodarność lub na nagrzewanie wypadną większe, niż dla prądu stałego, a

2) obliczone na spadek napięcia wypadną zupełnie tej samej wartości.

Tablica X. *Oporność 1 km przewodu żelaznego w  $\Omega$  przy prądzie zmiennym o częstotliwości 50 okresów na sekundę.*

Przekrój w mm <sup>2</sup>	Liczba drutów skręconych i ich średnica w mm	Gatunek H 00; wytrzymał. 70 kg/mm <sup>2</sup> ; $k =$ $= 7,34 \frac{m}{\Omega \text{ mm}^2}$					Gatunek H 000; wytrzymał. 70 kg/mm <sup>2</sup> ; $k =$ $= 8,81 \frac{m}{\Omega \text{ mm}^2}$				
		gęstość prądu w A/mm <sup>2</sup>					gęstość prądu w A/mm <sup>2</sup>				
		0	0,4	0,7	1,0	1,3	0	0,4	0,7	1,0	1,3
1	1 × 1,1	136	136	136	136	136	114	114	114	114	114
1,5	1 × 1,4	90	90	90	90	91	76	76	77	78	79
2,5	1 × 1,8	54	55	55	57	58	44	47	48	50	52
"	7 × 0,7	54	54	54	54	54	44	45	45	46	46
4	1 × 2,3	34	34	37	38	39	28	30	32	35	35
"	7 × 0,9	34	34	34	34	34	28	28	28	28	28
6	7 × 1,1	22,5	22,5	22,5	22,5	22,5	19	19	19	19	19
10	7 × 1,4	13,6	13,6	13,6	13,6	14,2	11,4	11,4	11,4	11,7	12,3
16	7 × 1,7	8,5	8,9	9,1	9,5	9,9	7,1	7,6	7,6	8,1	8,2
"	19 × 1,1	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	7,1	7,1	7,1	7,3	7,4
25	7 × 2,2	5,4	5,5	5,9	6,2	6,4	4,5	4,8	5,0	5,2	5,75
"	19 × 1,3	5,4	5,7	5,9	6,0	6,0	4,5	4,95	5,1	5,45	5,6
35	7 × 2,5	3,9	4,4	4,9	5,2	5,2	3,25	3,9	4,2	4,45	4,75
"	19 × 1,6	3,9	4,0	4,2	4,3	4,2	3,25	3,4	3,55	3,9	3,95
50	7 × 3,0	2,7	3,4	4,2	4,2	4,0	2,25	3,0	3,9	3,9	3,7
"	19 × 1,8	2,7	3,3	3,5	3,6	3,5	2,25	2,8	2,9	3,25	3,25
"	37 × 1,3	2,7	3,0	3,1	3,3	3,4	2,25	2,65	2,9	3,05	3,1
70	19 × 2,2	1,94	2,3	2,6	2,6	2,5	1,62	2,05	2,2	2,4	2,35
"	37 × 1,6	1,94	2,1	2,2	2,3	2,3	1,62	1,85	2,05	2,15	2,15
95	19 × 2,5	1,43	1,95	2,2	2,2	2,05	1,2	1,8	1,95	2,05	1,95
"	37 × 1,8	1,43	1,75	1,85	1,9	1,85	1,2	1,5	1,75	1,75	1,75
"	7 × 7 × 1,6	1,43	1,50	1,65	1,7	1,7	1,2	1,3	1,40	1,50	1,50
120	37 × 2,0	1,13	1,55	1,65	1,55	1,5	0,95	1,25	1,45	1,50	1,45
"	7 × 7 × 1,8	1,13	1,25	1,35	1,45	1,45	0,95	1,10	1,15	1,20	1,25
150	37 × 2,3	0,91	1,35	1,45	1,3	1,2	0,75	1,10	1,25	1,20	1,15
"	7 × 7 × 2,0	0,91	1,05	1,15	1,25	1,2	0,75	0,95	1,05	1,10	1,05

### § 43. Naskórkowość.

Dotychczas przypuszczaliśmy, że prąd płynie, rozkładając się na cały przekrój przewodnika zupełnie równomiernie. Dla prądów stałych jest to przypuszczenie uzasadnione. Inaczej jest z prądami zmiennymi. Zmienne pole magnetyczne, wzbudzone przez prąd roboczy, wznicią poboczne prądy wirowe, które występują najsilniej w osi przewodnika i mają kierunek przeciwny kierunkowi prądu roboczego (na rys. 130 prądy robocze oznaczono strzałkami grubymi, a prądy wirowe — przerywanymi). Obwody prądów wirowych zamykają się zdala od osi, pod „naskórką” przewodu i tu mają ten sam kierunek, co prąd roboczy. Skutkiem tego zmniejsza się prąd w samym rdze-

niu, a zwiększa się bliżej powierzchni. To wypieranie prądu z osi przewodu nazywamy naskórkowością.

Podzielmy przekrój przewodu na dwie części o równej powierzchni: część wewnętrzną w kształcie koła i zewnętrzną w kształcie pierścienia (rys. 130). Przewód nasz rozdzieli się na dwa przewody: wewnętrzny w kształcie walca, zewnętrzny — w kształcie rurki. Gdy przez  $r$  oznaczmy oporność całego przewodu, to obie części tego przewodu będą miały oporności jednakowe i równe  $\frac{1}{2}r$ . Prąd stały o natężeniu  $I$ , płynąc po przewodzie, rozszczepi się na dwie równe części po  $\frac{I}{2}$ , a strata mocy w całym przewodzie wyniesie:

$$\left(\frac{I}{2}\right)^2 2r + \left(\frac{I}{2}\right)^2 2r = I^2 r.$$

Prąd zmienny o tem samym natężeniu  $I$  rozszczepi się na części nierówne: prąd większy  $\frac{I}{2} + j$  popłynie rurką zewnętrzną, a prąd mniejszy  $\frac{I}{2} - j$  rdzeniem wewnętrznym. Strata mocy wypadnie:

$$\left(\frac{I}{2} + j\right)^2 2r + \left(\frac{I}{2} - j\right)^2 2r = I^2 r + \underbrace{4j^2 r}_{\text{przyrost}}.$$

A zatem, skutek naskórkowości zwiększyła się strata mocy. Dla uproszczenia sprawy oznaczmy znaną stratę mocy przez  $I^2 r_{em}$ :

$$I^2 r + 4j^2 r = I^2 r_{em},$$

gdzie  $r_{em}$  będzie umyślną opornością przewodu przy prądzie zmiennym. Oporność ta będzie większa od oporności przy prądzie stałym. Możemy sobie wyobrazić, że wskutek wypierania prądu rdzeń przewodnika przestał pracować, a więc przekrój użytkowy zmniejszył się, a oporność wzrosła.

Przyrost oporności przy prądzie zmiennym zależy od wielu czynników. Przedewszystkiem zależy od gatunku materiału przewodowego. W przewodnikach z materiału niemagnetycznego, np. z miedzi, brązu i glinu przyrost oporności jest tak nieznaczny, że bierze się go w rachubę tylko w wyjątkowych przypadkach w linjach dalekośnych przy znacznej grubości lub przy wielkiej częstotliwości. Natomiast w przewodach żelaznych i stalowych naskórkowość występuje w znacznym stopniu. Różne gatunki żelaza dają rozmaite przyrosty oporności. Nieraz się zdarza, że gatunki lepsze, o większej przewodności właściwej, wskutek większej przenikalności magnetycznej, przedstawiają dla prądu

zmiennego większą oporność, niż gatunki poślednie. Jedne gatunki są lepsze dla prądu stałego, a inne — dla prądu zmiennego.

Przyrost oporności zależy od przekroju przewodnika i od jego ustrój u. Im większy jest przekrój, tem silniej występuje zjawisko naskórkowości. Linki giętkie, złożone z większej liczby cienkich drucików, mają mniejszą oporność dla prądu zmiennego, niż linki, zwite z drutów grubych. Najmniejszą oporność wykazują linki, złożone ze skrętek, o odmiennych kierunkach skręcania (lewych i prawych).

Naskórkowość zależy od częstotliwości prądu. Przyrost oporności jest mniej więcej proporcjonalny do drugiej potęgi częstotliwości.

Wreszcie naskórkowość zależy od gęstości prądu. Przy bardzo małym prądzie oporność dla prądu zmiennego nie różni się od oporności dla prądu stałego. W miarę powiększania się gęstości prądu, przyrost oporności początkowo zwiększa się, osiąga pewne maximum, poczem maleje.

Oporność dla prądu zmiennego można obliczyć wg następujących przybliżonych wzorów:

$$\left. \begin{array}{l} \text{dla miedzi o przewodności } k = 58 \frac{m}{\Omega \text{ mm}^2}: \\ R_{zm} = R (1 + 7 f^2 d^4 10^{-7}), \\ \text{dla glinu o przewodności } k = 35 \frac{m}{\Omega \text{ mm}^2}: \\ R_{zm} = R (1 + 2,5 f^2 d^4 10^{-7}), \end{array} \right\} \quad (102)$$

dla materiałów magnetycznych:

$$R_{zm} = R \left\{ 1 + \frac{4 \pi^2}{12 \cdot 10^{14}} (f s \mu k)^2 - \frac{16 \pi^4}{180 \cdot 10^{28}} (f s \mu k)^4 \right\}, \quad (103)$$

przyczem  $f$  jest częstotliwością prądu,  $d$  — średnicą przewodu w  $cm$ ,  $s$  — przekrojem w  $mm^2$ ,  $\mu$  — przenikalnością magnetyczną materiału przewodowego przy danej gęstości prądu,  $k$  — przewodnością właściwą.

Tablica X podaje oporności na prąd zmienny dla dwóch gatunków żelaza („H00“ i „H000“) przy normalnej częstotliwości 50 okresów na sekundę i przy różnych gęstościach prądu (0; 0,4; 0,7; 1,0 i 1,3  $A/mm^2$ ).

*Przykład 58.* Tor zamknięty ten sam, co w przykładzie 52-im (rys. 124). Obliczyć przekrój jednostajny dla przewodu z żelaza H00 ( $k = 7,34$ ) na 5% dopuszczalnego spadku napięcia, czyli na 6 V.

Kierujemy się rozplywem prądów watowych (rys. 125-1). Początkowo obliczamy przekrój bez uwzględnienia naskórkowości:

$$s = \frac{2}{7,34 \cdot 6} (24,26 \cdot 180 - 14 \cdot 60) = 106 \text{ mm}^2.$$

Z tablicy X wybieramy rodzaj przewodnika, powiększając znaleziony przekrój ze względu na naskórkowość. Przypuszczalnie, będzie się nadawał przekrój  $120 \text{ mm}^2$  przy większej liczbie drucików ( $7 \times 7 \times 1,8$ ), albo przekrój  $150 \text{ mm}^2$  przy mniejszej liczbie drutów ( $37 \times 2,3$ ). Sprawdzamy spadek napięcia w jednym i drugim przypadku.

1)  $s = 120 \text{ mm}^2 \dots 7 \times 7 \times 1,8$ . Gęstość prądu rzeczywistego (rys. 125-III) w odcinkach  $a, b, c$  wyniesie:

$$\frac{24,57}{120} \approx 0,2 \text{ A/mm}^2 \quad \frac{14,55}{120} \approx 0,12 \text{ A/mm}^2.$$

Oporność  $1 \text{ km}$  przewodu przy tej gęstości znajdziemy z tablicy X przez interpolację:

$$1,19 \, \Omega \quad 1,17 \, \Omega.$$

Spadek napięcia w punkcie spływu  $c$  wyniesie:

$$\Delta E_{a,c} = 24,26 \cdot 1,19 \cdot \frac{2 \cdot 70}{1000} + 10,26 \cdot 1,17 \cdot \frac{2 \cdot 60}{1000} = 5,49 < 6 \text{ V}.$$

2)  $s = 150 \text{ mm}^2 \dots 37 \times 2,3$ . Gęstość prądu wyniesie:

$$\frac{24,57}{150} = 0,165 \text{ A/mm}^2 \quad \frac{14,55}{150} = 0,097 \text{ A/mm}^2,$$

oporność  $1 \text{ km}$  przewodu wg tablicy X:

$$1,10 \, \Omega \quad 1,02 \, \Omega,$$

a największy spadek napięcia

$$\Delta E_{a,c} = 24,26 \cdot 1,1 \cdot \frac{2 \cdot 70}{1000} + 10,26 \cdot 1,02 \cdot \frac{2 \cdot 60}{1000} = 5,02 < 6 \text{ V}.$$

Oba rodzaje przewodników odpowiadają wymaganiom.

#### § 44. Projektowanie sieci.

Sieci prądu stałego składały się tylko z dwóch części: 1) torów zasilających i 2) sieci rozsyłowej; natomiast sieci prądu zmiennego składają się zwykle z trzech części: 1) torów zasilających wysokiego napięcia, 2) sieci wysokiego napięcia czyli sieci pierwotnej i 3) sieci niskiego napięcia czyli wtórnej.

Energja płynie z elektrowni torami zasilającemi, wpływa przez punkty zasilające do sieci pierwotnej, a z sieci pierwotnej przez transformatory przedostaje się do sieci wtórnej. Ogniwami, łączącemi tory zasilające z siecią pierwotną, są punkty zasilające, a ogniwami, łączącemi sieć pierwotną z wtórną — transformatory. Dla sieci pierwotnej transformatory są odbiornikami prądu, dla sieci wtórnej — źródłami prądu.

Większe instalacje odbiorcze czerpią prąd z sieci pierwotnej i doprowadzają bezpośrednio prąd wysokiego napięcia do wielkich silników, albo też najpierw przetwarzają prąd z wysokiego napięcia na niskie

we własnych transformatorach, a po przetworzeniu rozsyłają go do rozmaitych odbiorników. Średnie zaś i mniejsze instalacje odbiorcze przystosowane są do napięcia niskiego i czerpią prąd z sieci wtórnej. Tak więc, przez tory zasilające i sieć pierwotną przechodzi cała energia, wysyłana z elektrowni, natomiast przez sieć wtórną przechodzi tylko część tej energii, przeznaczona dla średnich i mniejszych odbiorców.

Kosztorys sieci składa się z dwóch zasadniczych części: 1) kosztów sieci pierwotnej wraz z torami zasilającymi ....  $F_1$  i 2) kosztów sieci wtórnej wraz z transformatorami ....  $F_2$ .

Tory zasilające.	}	$F_1$
Punkty zasilające, przyłączenie torów zasilających do elektrowni, połączenie punktów zasilających z torami zasilającymi i z siecią pierwotną.		
Sieć pierwotna.		
Stacje transformatorowe, połączenie stacyj z siecią pierwotną i wtórną .... $F_1$ .	}	$F_2$
Sieć wtórna ... $F_2$ .		

Projektowanie sieci rozpoczynamy od ustalenia odbiorów prądu z sieci wtórnej. Dla sieci wtórnej transformatory odgrywają rolę punktów zasilających. Im większa jest liczba transformatorów ....  $N_2$ , tem mniejszy wypadnie przekrój przewodów sieci wtórnej ....  $s_2$ . Zależność między temi wielkościami jest taka sama, jak przy prądzie stałym między liczbą punktów zasilających a przekrojem przewodów rozsyłowych. Wzory (75) i (76) pozostają w mocy bez żadnej zmiany (wskaźnik „2”, dodany do wszystkich symboli, oznacza, że te wielkości tyczą się sieci wtórnej):

$$s_2 = 0,75 \frac{P_2 S_2}{k_2 E_2 \Delta E_2 (\Sigma l_2)} \sqrt[4]{\frac{n_2}{N_2^5}} \quad (104)$$

$$N_2 = \sqrt[5]{\left( \frac{0,75 P_2 S_2}{k_2 s_2 E_2 \Delta E_2 (\Sigma l_2)} \right)^4 n_2}. \quad (105)$$

Aby ustalić liczbę transformatorów gospodarczo najkorzystniejszą, trzeba przedewszystkiem ułożyć kosztorys całej sieci wtórnej wraz ze stacjami transformatorowymi. Koszt sieci wtórnej  $F_{p_2}$  wyrazi się takim samym wzorem, jak koszt sieci rozsyłowej prądu stałego (§ 35, wzór b):

$$F_{p_2} = 2 (\Sigma l_2) (a_2 s_2 + c_2). \quad (a)$$

Stacja transformatorowa składa się z kiosku, transformatora, przyrządów rozdzielczych i ochronnych, tudzież z połączeń transformatora z siecią pierwotną i wtórną. Koszt stacji transformatorowej można wyrazić wzorem:

$$f + g P,$$

w którym  $f$  będzie kosztem, niezależnym od mocy transformatora (koszt kiosku, połączeń, montażu i część stała kosztu transformatora i przyrządów).  $g P$  — kosztem, proporcjonalnym do mocy transformatora  $P$  (pozostała część kosztu transformatora i przyrządów). Koszt wszystkich  $N_2$  stacji transformatorowych wyniesie zatem:

$$F_1 = N_2 (f + g P), \quad (b)$$

przyczem  $P$  będzie oznaczało średnią moc jednej stacji transformatorowej w watach. Wreszcie, koszt całej sieci wtórnej wraz ze stacjami transformatorowymi ....  $F_2$  wyrazi się wzorem:

$$F_2 = F_{12} + F_1 = 2 (\Sigma l_2) (a_2 s_2 + c_2) + N_2 (f + g P),$$

czyli

$$F_2 = a_2 \underbrace{\left[ 2 (\Sigma l_2) s_2 \right]}_{(1)} + \underbrace{2 (\Sigma l_2) c_2}_{(2)} + \underbrace{N_2 f}_{(3)} + \underbrace{g (N_2 P)}_{(4)}.$$

Rozpatrzmy każdą pozycję kosztorysową z osobna i sprawdźmy ich zależność od liczby transformatorów  $N_2$ .

1) Pierwsza pozycja  $a_2 [2 (\Sigma l_2) s_2]$  jest iloczynem współczynnika  $a_2$  przez objętość miedzi sieci wtórnej, a więc jest to do pewnego stopnia „koszt miedzi w sieci wtórnej“. W sieciach wtórnych prądu zmiennego przekrój  $s_2$  jest skrupowany tylko dopuszczalnym spadkiem napięcia  $\Delta E_2$ . Przekrój ten jest odwrotnie proporcjonalny do liczby transformatorów w potęgę  $3/4$ , a więc i koszt miedzi w sieci wtórnej jest również odwrotnie proporcjonalny do liczby transformatorów w potęgę  $3/4$ .

2) Następną pozycję  $2 (\Sigma l_2) c_2$  — „koszt przyborów i montażu sieci wtórnej“ jest wielkością stałą, niezależną od liczby transformatorów.

3) Pozycja  $N_2 f$  — „koszt kiosków, montażu i częściowy koszt transformatorów i przyrządów“ jest wielkością wprost proporcjonalną do liczby transformatorów.

4) Wreszcie ostatnia pozycja  $g (N_2 P)$  — „częściowy koszt transformatorów i przyrządów“ nie zależy od liczby transforma-

torów, gdyż iloczyn  $N_2 P$  jest wielkością stałą, nieco większą od mocy  $P_2$ , wydawanej z sieci wtórnej. Gdy liczba transformatorów  $N_2$  będzie zmniejszona, to tem samem zwiększy się średnia moc jednego transformatora  $P$ , i odwrotnie.

Tak więc, z czterech powyższych pozycji kosztorysowych tylko dwie zależą od liczby stacyj transformatorowych (por. ze wzorem 80):

$$F_2' = a_2 \left[ 2(\Sigma l_2) s_2 \right] + N_2 f \quad (106)$$

$\begin{array}{c} \text{kiosk, montaż, część trans-} \\ \text{formatora i przyrządów} \\ \text{miedź w sieci wtórnej} \end{array}$

W tym przypadku nie trzeba obliczać kosztów rocznych przesyłania prądu (por. § 36), gdyż ze wszystkich pozycji tych kosztów jedynie tylko odsetki od kapitału  $F_2'$  zależą od liczby transformatorów. Innemi słowy, roczne koszty będą najmniejsze przy tej liczbie transformatorów, przy której kapitał  $F_2'$  będzie najmniejszy. Wykres 107 można zastosować i do tego przypadku z tą jedynie zmianą, że na górnej osi rzędnych będziemy odkładali koszty  $N_2 \cdot f$ . Przy zbyt małej liczbie transformatorów koszty zakładowe wypadają za wielkie wskutek nadmiernej ilości miedzi w sieci wtórnej, a przy zbyt wielkiej liczbie transformatorów koszty zakładowe są za wielkie wskutek nadmiaru kiosków, transformatorów i przyrządów.

Zestawienie dwóch pozycji kosztorysowych dla kilku alternatyw (podobnie, jak w przykł. 42-im) doprowadzi do znalezienia gospodarczo najkorzystniejszej liczby stacyj transformatorowych.

Przechodzimy do sieci pierwotnej. Obciążenie sieci składa się częściowo z instalacyj, przyłączonych wprost do tej sieci, a częściowo z transformatorów. Moc, czerpaną przez transformatory, obliczymy z rozplywu prądów w sieci wtórnej, dodając kilka procent na straty w samych transformatorach. Sieć pierwotna otrzymuje prąd z torów zasilających zupełnie tak samo, jak przy prądzie stałym. Zależność między liczbą punktów zasilających  $N_1$  a przekrojem przewodów sieci pierwotnej  $s_1$  wyraża się temi samemi wzorami (75) i (76) bez żadnej zmiany (wskaznik „1” przy symbolach oznacza, że wielkości tyczą się sieci pierwotnej):

$$s_1 = 0,75 \frac{P_1 S_1}{k_1 E_1 \Delta E_1 (\Sigma l_1)} \sqrt[4]{\frac{n_1}{N_1^5}} \quad (107)$$

$$N_1 = \sqrt[5]{\left( \frac{0,75 P_1 S_1}{k_1 s_1 E_1 \Delta E_1 (\Sigma l_1)} \right)^4 n_1} \quad (108)$$

Wreszcie gospodarczo najkorzystniejszą liczbę punktów zasilających znajdziemy, zestawiając trzy pozycje kosztów zakładowych, zależne od liczby punktów zasilających tak, jak czyniliśmy to przy prądach stałych, w przypadku 1-ym (str. 160). Wzór (80) pozostaje bez zmiany (wskaznik „0” przy symbolach oznacza, że wielkości te tyczą się torów zasilających):

$$F_1' = c_0 (2 N_1 l_0) + N_1 C_0 + a_1 [2 (\Sigma l_1) s_1] \quad (109)$$

przybory torów zasil.  
 punkty zasil. i przył.  
 torów zasil.

miedź sieci pierwotnej

Co się tyczy dopuszczalnych spadków napięcia. to do sieci wtórnej stosują się mniej więcej te same stawki, które podaliśmy w § 2 dla prądów stałych (str. 8):

3 do 4%.

Inaczej jest z siecią pierwotną. Gdybyśmy i w sieci pierwotnej dopuścili tak wielkie spadki napięcia, to w sieci wtórnej, już przy samych transformatorach, napięcia różniłyby się o 3 do 4%, po przewodach płynęłyby znaczne prądy wyrównawcze, a napięcia przy odbiornikach różniłyby się już nie o 3 do 4%, lecz o 6 do 8%. Spadki bowiem obu sieci dodają się ze sobą.

To też dla sieci pierwotnej wyznaczamy spadki jak najmniejsze w granicach od

0,5 do 1,5%.