

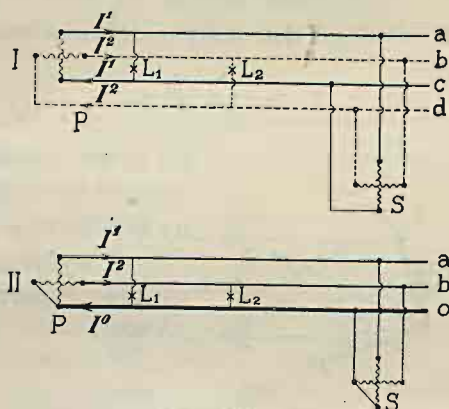
ROZDZIAŁ X.

Prąd wielofazowy.

§ 45. Zasada układu wielofazowego.

Kilka torów prądu stałego dało układ wieloprzewodowy. Kilka zaś torów prądu zmiennego o napięciach, przesuniętych w fazie względem siebie, dadzą układ wielofazowy.

Rys. 131-I przedstawia układ *dwufazowy nieskojarzony*. Prądnicą P ma dwa uzwojenia, przesunięte w fazie o 90° . Z maszyny wychodzą cztery przewody, które tworzą dwa tory: 1) $a - c$, 2) $b - d$. Napięcie każdego toru czyli każdej fazy nazywamy napięciem fazowym. Lampy elektryczne (na rys. — L_1, L_2) czerpią prąd z poszczególnych faz, a silniki (na rys. — S) — z obu faz jednocześnie. Napięcie oświetleniowe, odpowiadające napięciu lamp, przyłączonych do sieci, równa się w układzie dwufazowym napięciu fazowemu. Najwyższe napięcie panuje między przewodami różnych faz: $a - b$, $a - d$, $c - b$, $c - d$, przyczem napięcie to jest $\sqrt{2}$ razy większe od napięcia oświetleniowego.



Rys. 131.

Gdybyśmy zetknęli przewody c i d na całej ich długości (rys. 131-II), nicby się nie zmieniło w pracy maszyn P i S , ani w świetle lamp. W ten sposób skojarzylibyśmy obie fazy, zmniejszając liczbę przewodów do trzech. Układ taki nazywamy *skojarzonym układem dwufazowym*.

Przewody a i b , pozostawione pomimo skojarzenia bez zmiany, nazywamy skrajniami, a przewód o , który powstał przez połączenie przewodów c i d , — powrotnym albo wspólnym.

W układach wielofazowych można rozmaicie oznaczać strzałkami

kierunki prądów. Na rys. 131 na przewodach powrotnych postawiliśmy strzałki odwrotne, a mogliśmy również przyjąć zasadę strzałkowania wszystkich przewodów w kierunku przesyłania energii, a więc od źródła do odbiornika. Obranie tej lub innej zasady wpływa tylko na wygląd wykresu wektorowego. Objaśnimy to na przykładzie.

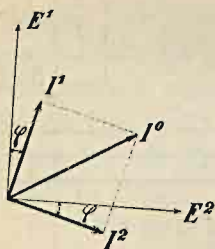
Zbudujmy wykres wektorowy dla pierwszego przypadku, a więc dla rys. 131-II. Kreślimy (rys. 132) wektory napięć fazowych: E^1 , E^2 , wektory prądów: I^1 , I^2 i przystępujemy do wykreślenia prądu I^0 , płynącego w przewodzie powrotnym. Suma prądów, zbiegających się w silniku S , musi się równać zero, a więc zgodnie z kierunkami strzałek:

$$\hat{I}^1 + \hat{I}^2 - \hat{I}^0 = 0 \quad \text{czyli} \quad \hat{I}^0 = \hat{I}^1 + \hat{I}^2.$$

Działanie to ilustruje wykres na rys. 132.

Gdybyśmy jednak na rys. 131-II wszystkie przewody oznaczyli strzałkami o tym samym kierunku, wówczas otrzymalibyśmy:

$$\hat{I}^1 + \hat{I}^2 + \hat{I}^0 = 0 \quad \text{czyli} \quad \hat{I}^0 = -(\hat{I}^1 + \hat{I}^2).$$



Na wykresie wektorowym prąd I^0 miałby tę samą wartość bezwzględną, co na rys. 132, lecz kierunek przeciwny (na lewo, w dół).

Z wykresu na rys. 132 wynika, że prąd powrotny I^0 przy jednakowym obciążeniu obu faz wynosi:

$$I^0 = \sqrt{2} I. \quad (110)$$

Rys 132.

A zatem prąd powrotny przez skojarzenie torów zmniejszył się z $2I$ (płynących w przewodach; c, d) do $\sqrt{2} \cdot I$, co pozwala na wprowadzenie pewnej oszczędności w materiale przewodowym.

Prąd trójfazowy wytwarza prądnica o trzech uzwojeniach, przesuniętych w fazie względem siebie o 120° . Prąd trójfazowy nieskojarzony wymagałby sześciu przewodów. W praktyce stosuje się niemal wyłącznie prąd trójfazowy skojarzony w układzie trójkątowym o trzech przewodach lub w układzie gwiazdowym o trzech lub czterech przewodach.

W układzie trójkątowym wszystkie trzy uzwojenia połączone są w obwód i tworzą jakby trójkąt. Wierzchołki tego trójkąta łączą się z przewodami. Rys. 133 przedstawia dopływ prądu do silnika, uzwo-

jonego w trójkąt, a także wykres wektorowy prądów fazowych: j^{12} , j^{23} , j^{31} , płynących po zwojach silnika, i prądów przewodowych: I^1 , I^2 , I^3 . Prądy przewodowe oznaczamy strzałkami w kierunku przepływu energii (od źródła do odbiornika), a prądy fazowe — strzałkami obiegowymi w kierunku dowolnym (na rys. — w kierunku wskazówki zegarowej). Jak widać z rysunku,

$$\hat{I}^1 + \hat{j}^{31} = \hat{j}^{12} \quad \hat{I}^2 + \hat{j}^{12} = \hat{j}^{23} \quad \hat{I}^3 + \hat{j}^{23} = \hat{j}^{31},$$

prądy przewodowe równają się różnicy geometrycznej sąsiednich prądów fazowych. Gdy wszystkie trzy fazy są obciążone z jednakowym natężeniem j i z jednakowym kątem przesuwu fazy φ , wówczas prąd przewodowy I wyniesie:

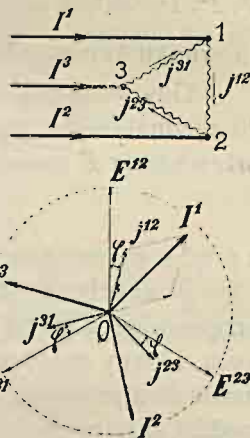
$$I = \sqrt{3} \cdot j. \quad (111)$$

W układzie gwiazdowym jedne końce uzwojeń są połączone w węzeł, zwany punktem zerowym lub obojętnym, z którego wychodzi przewód zerowy czyli obojętny, a drugie końce uzwojeń łączą się z przewodami skrajnymi. Rys. 134 przedstawia dopływ prądu do silnika, uzwojonego w gwiazdę, a także wykres wektorowy napięć fazowych czyli gwiazdowych: e^1 , e^2 , e^3 , panujących w zwojach silnika i napięć skojarzonych czyli międzyprzewodowych: E^{12} , E^{23} , E^{31} .

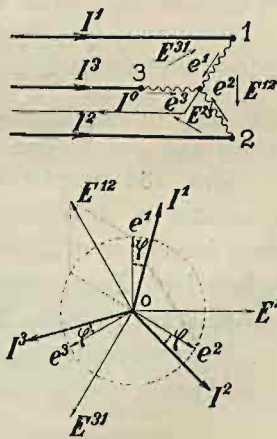
Prądy przewodowe oznaczamy strzałkami w kierunku przepływu energii. Ten sam kierunek nadajemy napięciom gwiazdowym (na rys. — kierunek dośrodkowy). Napięcia międzyprzewodowe oznaczamy strzałkami o dowolnym kierunku obiegowym (na rys. — w kierunku wskazówki zegarowej). Jak widać z rysunku,

$$\hat{E}^{12} + \hat{e}^2 = \hat{e}^1 \quad \hat{E}^{23} + \hat{e}^3 = \hat{e}^2 \quad \hat{E}^{31} + \hat{e}^1 = \hat{e}^3,$$

napięcia międzyprzewodowe równają się różnicy geometrycznej napięć fazowych.



Rys. 133.



Rys. 134

Prąd w przewodzie obojętnym I^0 oznaczamy kierunkiem dowolnym. Na rys. wyznaczyliśmy kierunek odwrotny prądom przewodowym: I^1, I^2, I^3 . W tym przypadku wektor prądu I^0 równa się co do wartości i kierunku sumie geometrycznej prądów: $\hat{I}^1 + \hat{I}^2 + \hat{I}^3$.

Gdy wszystkie trzy fazy mają obciążenie o jednakowym natężeniu I i z jednakowym kątem przesuwu fazy φ , wówczas napięcie międzyprzewodowe E wyniesie:

$$E = \sqrt{3} \cdot e, \quad (112)$$

a prąd w przewodzie obojętnym będzie się równał zeru.

W układzie trójkątowym silniki przyłącza się do wszystkich trzech przewodów, a w układzie gwiazdowym — do trzech przewodów skrajnych. Lamy zaś elektryczne włącza się w układzie trójkątowym między każde dwa przewody, a w układzie gwiazdowym — między jeden z przewodów skrajnych a obojętny. Napięcie oświetleniowe, odpowiadające napięciu lamp, przyłączonych do sieci, równa się w układzie trójkątowym napięciu międzyprzewodowemu: E^{12}, E^{23}, E^{31} , a w układzie gwiazdowym — gwiazdowemu: e^1, e^2, e^3 . Wreszcie najwyższe napięcie, panujące między przewodami, w pierwszym układzie równa się napięciu oświetleniowemu, a w układzie gwiazdowym jest $\sqrt{3}$ razy większe od napięcia oświetleniowego.

Prąd zmienny, płynący po dwóch przewodach, dla odróżnienia od prądów wielofazowych, nazywamy jednofazowym.

§ 46. Fazy obciążone jednakowo.

Rys. 135 przedstawia tor trójfazowy czteroprzewodowy, zasilany w punkcie a , a obciążony w punkcie z jednakowo we wszystkich trzech fazach, w układzie *gwiazdowym*. Budujemy wykres wektorowy dla fazy 1-ej. Zaczynamy od napięcia fazowego e_s^1 (wektor \overline{ob}), panującego na krańcu toru z . Z opóźnieniem φ_s kreślimy wektor prądu I^1 .

W przewodzie 1-ym występuje strata napięcia, równa iloczynowi prądu I przez oporność r (wzór 87):

$$\overline{\Delta e_{as}} = I r. \quad (a)$$

Do napięcia na krańcu e_s^1 (wektor \overline{ob}) dodajemy geometrycznie stratę napięcia $\overline{\Delta e_{as}}$ (wektor \overline{bc}) i otrzymujemy napięcie na początku toru e_a^1 (wektor \overline{oc}):

$$\hat{e}_s^1 + \hat{\Delta e_{as}} = \hat{e}_a^1.$$

Zatoczywszy łuk cf promieniem oc , znajdziemy różnicę algebraiczną $e_a^1 - e_z^1$, czyli spadek napięcia Δe_{az} , w postaci odcinka \overline{bf} . Z punktu c opuszczamy prostopadłą cd na promień of . Z pewnym przybliżeniem możemy przyjąć, że spadek napięcia Δe_{az} równa się odcinkowi \overline{bd} (odcinek \overline{df} , jako znikomo mały, pomijamy):

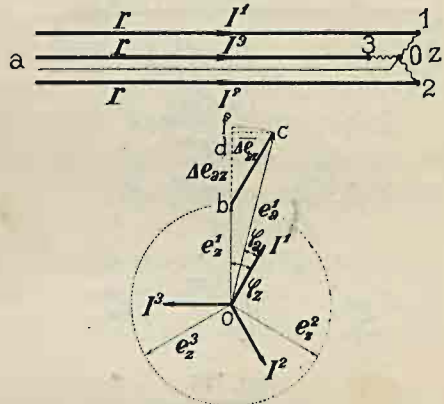
$$\Delta e_{az} \approx \Delta e_{az} \cos \varphi_z = I r \cos \varphi_z. \quad (b)$$

Takie same wykresy należałoby zbudować na wektorach: e_z^2, e_z^3 . Ponieważ fazy są obciążone jednakowo, przeto napięcia na początku toru: e_a^1, e_a^2, e_a^3 wypadłyby sobie równe i tak, jak na końcu toru, przesunięte względem siebie o 120° .

Przechodzimy do napięć międzyprzewodowych. Napięcia międzyprzewodowe wg wzoru (112) są $\sqrt{3}$ razy większe od fazowych. Tyczy się to zarówno napięć na początku toru, jak napięć na końcu toru:

$$E_a = \sqrt{3} \cdot e_a$$

$$E_z = \sqrt{3} \cdot e_z.$$



Rys. 135.

Ten sam stosunek będzie zachodził między różnicami tych napięć, a więc spadek napięcia międzyprzewodowego będzie również $\sqrt{3}$ razy większy od spadku napięcia fazowego:

$$\Delta E_{az} = \sqrt{3} \cdot \Delta e_{az} = \sqrt{3} \cdot I r \cos \varphi_z. \quad (c)$$

Rys. 136 przedstawia tor trójfazowy trójprzewodowy, zasilany w punkcie a , a obciążony w punkcie z jednakowo we wszystkich trzech fazach, w układzie *trójkątowym*. Budujemy wykres wektorowy. Zaczynamy od napięć: E_z^{12} (wektor \overline{ob}), E_z^{23} , E_z^{31} , panujących na krańcu toru z . Z opóźnieniem φ_z kreślimy wektory prądów fazowych: j^{12} , j^{23} , j^{31} . Odejmując geometrycznie od j^{12} prąd j^{31} , znajdujemy prąd przewodowy I^1 ; odejmując od j^{23} prąd j^{12} , znajdujemy I^2 ; wreszcie, odejmując od j^{31} prąd j^{23} , znajdujemy I^3 .

Obieg prądu w fazie 12 jest następujący: 1) w przewodzie 1-ym — w kierunku prądu przewodowego I^1 , 2) w uzwojeniu 12 — w kierunku prądu

fazowego j^{12} , 3) w przewodzie 2-im — w kierunku przeciwnym (patrz rys.) kierunkowi prądu przewodowego I^2 .

Straty napięcia w przewodach 1-y i 2-im będą miały jednakową wartość bezwzględną:

$$\Delta e_{az}^1 = \Delta e_{az}^2 = I r. \quad (d)$$

Aby znaleźć napięcie początkowe fazy 12 E_a^{12} (wektor od), należy dodać geometrycznie do napięcia krańcowego E_a^{12} (wektor ob)

stratę napięcia w przewodzie 1-y w kierunku prądu I^1 Δe_{az}^1 (wektor bc) i stratę w przewodzie 2-im w kierunku przeciwnym prądowi I^2 Δe_{az}^2 (wektor cd):

$$\hat{E}_a^{12} + \hat{\Delta e}_{az}^1 + \hat{\Delta e}_{az}^2 = \hat{E}_a^{12}.$$

Suma geometryczna obu strat: Δe_{az}^1 , Δe_{az}^2 jest wypadkową stratą fazy 12 ... $\Delta \overline{E}_{az}$ (wektor \overline{bd}):

$$\Delta e_{az}^1 + \Delta e_{az}^2 = \Delta \overline{E}_{az}$$

$$\Delta \overline{E}_{az} = \sqrt{3} \cdot \Delta e_{az} = \sqrt{3} \cdot I r. \quad (e)$$

Z punktu d opuszczamy prostopadłą df na promień of . Odcinek \overline{bf} z pewnym przybliżeniem możemy uważać za spadek napięcia ΔE_{az} :

$$\Delta E_{az} \approx \Delta \overline{E}_{az} \cos \varphi_z = \sqrt{3} \cdot I r \cos \varphi_z. \quad (f)$$

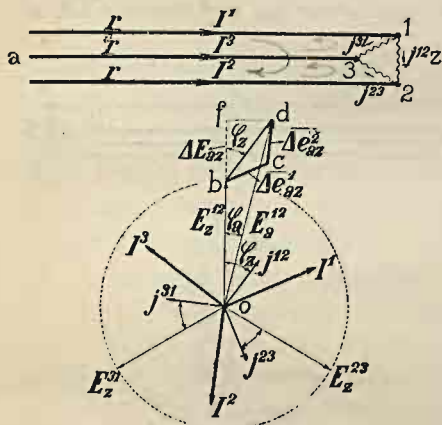
W obu powyższych przykładach, zarówno w układzie gwiazdowym, jak trójkątowym, dochodzimy do jednakowych wyników.

Strata napięcia w jednym przewodzie równa się iloczynowi prądu przewodowego przez oporność:

$$\Delta e_{az} = I r.$$

Jest to jednocześnie strata napięcia gwiazdowego e . W układzie gwiazdowym napięcie e jest napięciem oświetleniowym, w układzie zaś trójkątowym jest napięciem, panującym między przewodem a umyślnym punktem obojętnym (np. ziemią). Spadek napięcia gwiazdowego równa się iloczynowi składnika watowego prądu przewodowego przez oporność jednego przewodu:

$$\Delta e_{az} \approx (I \cos \varphi^*) r, \quad (113)$$



Rys. 136.

a spadek napięcia międzyprzewodowego jest $\sqrt{3}$ razy większy od spadku napięcia gwiazdowego:

$$\Delta E_{az} = \sqrt{3} \cdot \Delta e_{az} \approx \sqrt{3} (I \cos \varphi_s) r. \quad (114)$$

Zadania z dziedziny torów trójfazowych, obciążonych jednakowo we wszystkich trzech fazach, rozwiązujemy w ten sposób, że wydzielamy jeden z przewodów i traktujemy go wraz z napięciem gwiazdowym, jak przewód prądu jednofazowego. Obliczamy rozptyw prądów i spadki napięcia gwiazdowego. Mnożąc te spadki przez $\sqrt{3}$, znajdujemy spadki napięcia międzyprzewodowego.

Tory otwarte, obciążone w wielu punktach, rozwiązujemy ściślejszą metodą wykreślną (por. przykł. 50), bądź też, przyjąwszy na całej długości toru stały kierunek wektora napięcia roboczego, rozszczepiamy prądy na watywowe i bezwatywowe (por. przykł. 51). Tory zamknięte obliczamy tą drugą metodą albo, dla jeszcze większego uproszczenia, sprowadzamy wszystkie obciążenia do jednostajnego współczynnika mocy czyli do jednostajnego kąta przesuwu fazy (wzór 85).

Spadek napięcia gwiazdowego w torach o kilku punktach odbiorczych jest sumą iloczynów prądów watowych przez oporności jednego przewodu. Spadek ten możemy obliczyć momentami (porów. wzór 92):

$$\left| \Delta e_{az} \approx \sum_a^z \pm (i_p \cos \varphi_p) r_{pz} \right| \quad \begin{array}{l} \text{(sumowanie momentami;} \\ \text{+ zasilanie, — odbiór),} \end{array} \quad (115)$$

przyczem r_{pz} jest opornością jednego przewodu. Spadek napięcia międzyprzewodowego jest $\sqrt{3}$ razy większy od spadku napięcia gwiazdowego:

$$\left| \Delta E_{az} = \sqrt{3} \cdot \Delta e_{az} \right|. \quad (116)$$

Wreszcie strata mocy równa się sumie iloczynów z kwadratu rzeczywistych prądów przewodowych przez odpowiednie oporności (porównaj wzór 93):

$$\left| \Delta P_{az} = 3 \sum_a^z I_{pr}^2 r_{pr} \right| \quad \text{(sumowanie odcinkami).} \quad (117)$$

Przykład 59. Ustalić napięcia, prądy, kąty przesuwu i stratę mocy w torze otwartym az (rys. 137), obciążonym:

w punkcie b indukcyjnie mocą 2 394 W przy $\cos \varphi_b = 0,7$

„ c pojemnościowo „ 4 502 „ „ $\cos \varphi_c = 0,8$

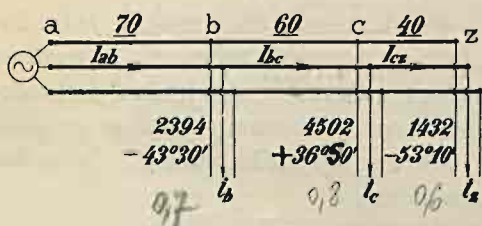
„ z indukcyjnie „ 1 432 „ „ $\cos \varphi_z = 0,6$.

Przewody miedziane o przekroju 16 mm^2 . Napięcie na krańcu $E_s = 92 \text{ V}$.

Wykres ten sam, co w przykładzie 50-ym (rys. 121), lecz w innej skali:

$$1 \text{ A} = 2 \text{ mm},$$

$$1 \text{ V} = 2 \text{ mm}.$$



Rys. 137.

Obliczamy umyślone napięcie gwiazdowe, panujące na krańcu toru:

$$e_s = \frac{92}{\sqrt{3}} = 53,2 \text{ V}$$

i odkładamy (rys. 121) wektor $od = 53,2 \text{ V}$. W odcinku cz płynię prąd:

$$I_{cs} = i_s = \frac{1432}{3 \cdot 53,2 \cdot 0,6} = 15 \text{ A}.$$

Odkładamy na wykresie kąt $\angle doh = \arccos 0,6 = 53^\circ 10'$ i wektor $oh = 15 \text{ A}$. Obliczamy stratę napięcia w jednym przewodzie na krańcowym odcinku cz:

$$\Delta e_{cs} = I_{cs} r_{cs} = \frac{15 \cdot 40}{57 \cdot 16} = 0,66 \text{ V},$$

kreślimy wektor $de = 0,66 \text{ V}$, równoległy do oh . Napięcie gwiazdowe w punkcie c (wektor oe) jest sumą geometryczną:

$$\hat{e}_c = \hat{e}_s + \Delta e_{cs} = 53,2 + 0,66 = 53,6 \text{ V}.$$

Obliczamy prąd odbioru w punkcie c:

$$i_c = \frac{4502}{3 \cdot 53,6 \cdot 0,8} = 35 \text{ A}.$$

Odkładamy na wykresie kąt $\angle eok = \arccos 0,8 = 36^\circ 50'$ (obciążenie pojemnościowe!) i wektor $ok = 35 \text{ A}$. Prąd przewodowy I_{bc} (wektor ol) jest sumą geometryczną:

$$\hat{I}_{bc} = \hat{I}_s + \hat{i}_c = 15 + 35 = 38,1 \text{ A}.$$

W ten sposób prowadzimy rachunek dalej, znajdując kolejno:

$$\Delta e_{bc} = \frac{38,1 \cdot 60}{57 \cdot 16} = 2,5 \text{ V} \quad \hat{e}_b = \hat{e}_c + \Delta e_{bc} = 53,6 + 2,5 = 56 \text{ V} \quad i_b = \frac{2394}{3 \cdot 56 \cdot 0,7} = 20 \text{ A}$$

$$\hat{I}_{ab} = \hat{I}_{bc} + \hat{i}_b = 38,1 + 20 = 51,3 \text{ A} \quad \Delta e_{ab} = \frac{51,3 \cdot 70}{57 \cdot 16} = 3,94 \text{ V} \quad \hat{e}_a = \hat{e}_b + \Delta e_{ab} = 56 + 3,94 = 59,9 \text{ V}.$$

Napięcie międzyprowadowe na początku toru wyniesie:

$$E_a = \sqrt{3} \cdot 59,9 = 103,6 \text{ V},$$

spadek napięcia na całej długości toru:

$$\Delta E_{as} = 103,6 - 92 = 11,6 \text{ V},$$

Aby uwzględnić stratę mocy w torach, mnożymy znalezione liczby przez stosunek napięcia zasilania do napięcia u odbiorników:

$$p_1 = 4869 \frac{120}{116} = 5037 \text{ W} \quad p_2 = 5366 \frac{120}{116} = 5551 \text{ W}.$$

Dla sprawdzenia obliczymy wypadkowy kąt przesuwu wg wzoru (85):

$$\varphi_0 = \arctg \frac{-2810 \cdot tg 43^\circ 30' + 5619 \cdot tg 36^\circ 50' - 1806 \cdot tg 53^\circ 10'}{2810 + 5619 + 1806} = -5^\circ 50'$$

I prądy zasilania w amperach:

$$i_1 = \frac{4869}{\sqrt{3} \cdot 116 \cdot \cos 5^\circ 50'} = 24,4 \text{ A} \quad i_2 = \frac{5366}{\sqrt{3} \cdot 116 \cdot \cos 5^\circ 50'} = 26,8 \text{ A}.$$

W ten sam sposób obliczamy rozptyw prądów w sieciach zamkniętych. Wydzielamy jeden przewód, rozszczepiamy prądy na watowe i bezwatowe, układamy i rozwiązujemy równania, wreszcie znalezione prądy przewodowe: watowe i bezwatowe dodajemy ze sobą geometrycznie.

Wzór równań dla prądów watowych (por. ze wzorami 29 i 84):

$$\left[\underbrace{\overline{\Delta e}_i^w \sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} g_{u_\alpha}}_{\text{wyrównawcze}} - \underbrace{\sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} \overline{\Delta e}_{i_\alpha}^w g_{u_\alpha}}_{\text{składowe}} - \underbrace{\sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} (\overline{i'_\alpha})^w}_{\text{odbiór}} - \underbrace{i_i^w}_{\text{odbiór}} = 0 \right], \quad (118)$$

przyczem $\overline{\Delta e}_i^w, \overline{\Delta e}_{i_1}^w, \dots, \overline{\Delta e}_{i_\alpha}^w, \dots, \overline{\Delta e}_{i_n}^w$ oznaczają składniki watowe strat napięcia gwiazdowego; $g_{u_1}, \dots, g_{u_\alpha}, \dots, g_{u_n}$ — przewodności jedno-przewodowych boków sieci w Ω^{-1} ; $(i'_1)^w, \dots, (i'_\alpha)^w, \dots, (i'_n)^w$ — prądy składowe, obliczone z prądów watowych; i_i^w — składnik watowy prądu, odbieranego z punktu węzłowego i .

Wzór równań dla prądów bezwatowych (por. ze wzorem 86):

$$\left[\underbrace{\overline{\Delta e}_i^b \sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} g_{u_\alpha}}_{\text{wyrównawcze}} - \underbrace{\sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} \overline{\Delta e}_{i_\alpha}^b g_{u_\alpha}}_{\text{składowe}} - \underbrace{\sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} (\pm i'_\alpha)^b}_{\text{odbiór}} - \underbrace{(\pm i_i)^b}_{\text{odbiór}} = 0 \right] \begin{matrix} (+ \text{wyprze-} \\ \text{dzanie;} \\ - \text{opóź-} \\ \text{nianie}), \end{matrix} \quad (119)$$

przyczem $\overline{\Delta e}_i^b, \overline{\Delta e}_{i_1}^b, \dots, \overline{\Delta e}_{i_\alpha}^b, \dots, \overline{\Delta e}_{i_n}^b$ oznaczają składniki bezwatowe strat napięcia gwiazdowego; $(i'_1)^b, \dots, (i'_\alpha)^b, \dots, (i'_n)^b$ — prądy składowe, obliczone z prądów bezwatowych; i_i^b — składnik bezwatowy prądu, odbieranego z punktu węzłowego i .

Posiłkując się metodą mniej ścisłą, będziemy operowali liczbami watów tak, jak gdyby to były liczby amperów, a równania ułożymy wg wzoru (118). Obliczone moce zasilania wypadnie skorygować, mnożąc je przez stosunek napięcia zasilania do napięcia średniego. Wypadkowy kąt przesuwu fazy znajdziemy ze wzoru (85).

Przechodzimy do prądów *dwufazowych*. Rys. 139 przedstawia tor dwufazowy trójprzewodowy, zasilany w punkcie *a*, a obciążony w punkcie *z* jednakowo w obu fazach. Budowę wykresu zaczynamy od napięć, panujących na krańcu: E_s^1, E_s^2 . Z opóźnieniem φ_s kreślimy wektory prądów fazowych: I^1, I^2 . Prąd I^0 jest sumą geometryczną:

$$\hat{I}^0 = \hat{I}^1 + \hat{I}^2.$$

Obliczamy stratę napięcia w 1-ym przewodzie skrajnym i w przewodzie powrotnym:

$$\Delta e_{az}^1 = I r; \Delta e_{az}^0 = I^0 r^0 = \sqrt{2} \cdot I r^0.$$

Napięcie zasilania w fazie 1-ej....

E_a^1 jest sumą geometryczną:

$$\hat{E}_a^1 = \hat{E}_s^1 + \hat{\Delta e}_{az}^1 + \hat{\Delta e}_{az}^0.$$

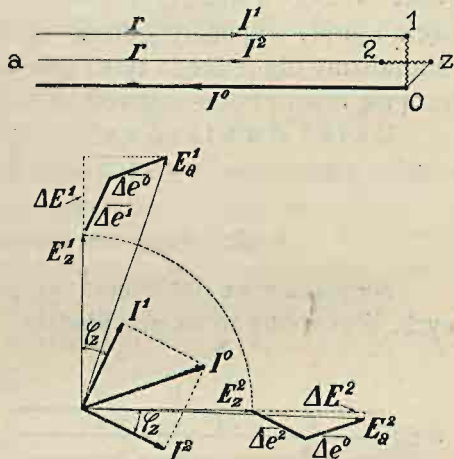
Ten sam rachunek prowadzimy i dla fazy 2-iej.

Rzuca się w oczy brak symetrii. Przyjęliśmy napięcia na krańcu: E_s^1, E_s^2 równe sobie i przesunięte względem siebie o 90° , a otrzymaliśmy napięcia zasilania: E_a^1, E_a^2 różnej wartości i przesunięte o kąt mniejszy od 90° . Obliczamy spadki napięcia. W tym celu rzutujemy straty napięcia $\hat{\Delta e}_{az}^1 + \hat{\Delta e}_{az}^0, \hat{\Delta e}_{az}^2 + \hat{\Delta e}_{az}^0$ na kierunki wektorów: E_s^1, E_s^2 i długość tych rzutów uważamy, jak zwykle, za spadki napięcia:

$$\Delta E_{az}^1 \approx \Delta e_{az}^1 \cos \varphi_s + \Delta e_{az}^0 \cos (45^\circ + \varphi_s)$$

$$\Delta E_{az}^2 \approx \Delta e_{az}^2 \cos \varphi_s + \Delta e_{az}^0 \cos (45^\circ - \varphi_s).$$

A zatem spadki napięcia ΔE_{az} w obu przewodach wyrażają się wzorem ogólnym:



Rys. 139.

$$\Delta E_{as} \approx Ir \cos \varphi_s + \sqrt{2} \cdot I r^0 \cos (45^\circ \pm \varphi_s) \quad (120)$$

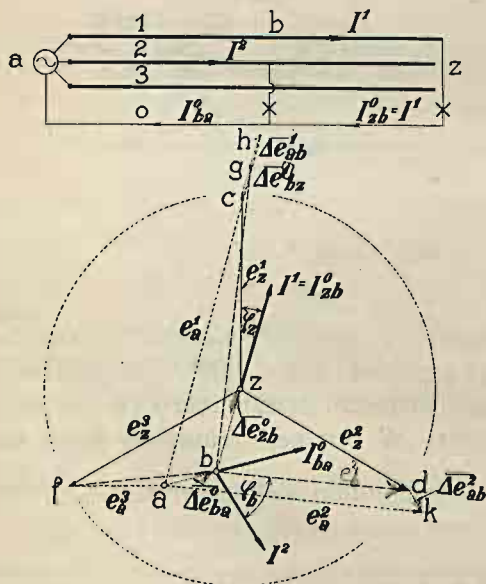
i mają w obu fazach różne wartości. Jedynie tylko przy obciążeniu opornościowym (bezindukcyjnym), gdy $\varphi_s = 0$, spadki wypadają jednakowe.

W prądach trójfazowych przy jednakowym obciążeniu faz panowała całkowita symetria. Wszystkie wektory jednej fazy były przesunięte wobec wektorów drugiej fazy o 120° . We wszystkich trzech fazach napięcia i prądy wypadły jednakowe. Rozpływ prądów i spadki napięcia obliczaliśmy dla jednego tylko przewodu, wiedząc, że osiągnięte wyniki tyczą się również obu przewodów pozostałych.

Układ dwufazowy jest niesymetryczny i wymaga osobnego traktowania każdej fazy.

§ 47. Fazy obciążone niejednakowo.

Niejednakowe obciążenie faz narusza symetrię układów trójfazowych. Wykażemy to na przykładzie.



Rys. 140.

Przykład 61. Tor trójfazowy czteroprzewodowy az jest obciążony indukcyjnie w fazie 1-ej w punkcie z i w fazie 2-ej w punkcie b . Ustalić napięcia, prądy i kąty przesuwu fazy, przypuszczając, iż na krańcu toru z panuje symetria i równość napięć.

Budujemy wykres (rys. 140). Z punktu z , jako ze środka, wprowadzamy wektory napięć, panujących na krańcu toru (z), przesunięte względem siebie o 120° :

$$zc = e_z^1 \quad zd = e_z^2 \quad ze = e_z^3.$$

Odcinek bz ; faza 1. Prąd I^1 , odbierany na krańcu toru, opóźnia się względem napięcia e_z^1 o kąt φ_s . Kreślimy wektor tego prądu. Prąd I^1 w przewodzie 1 daje stratę napięcia $\Delta e_{bz}^1 = I^1 r_{bz}^1$, a ten sam prąd w przewodzie 0 daje stratę napię-

cia $\Delta e_{bz}^0 = I^1 r_{bz}^0$. W kierunku, równoległym do prądu I^1 , odkładamy wektory obu tych strat. Ze względu na przejrzystość wykresu stratę Δe_{bz}^1 odkładamy u szczy-

tu wektora zc w postaci odcinka \overline{cg} , a stratę $\overline{\Delta e_{zb}^0}$ odkładamy u podnóża wektora w postaci odcinka \overline{zb} .

Aby znaleźć napięcie, panujące w punkcie b , rozpatrujemy obieg prądu w przewodach 1 i 0. Obieg prądu idzie zgodnie ze strzałkami prądu I^1 , podanymi na rysunku, a więc do napięcia e_s^1 należy dodać geometrycznie obie straty: $\overline{\Delta e_{bz}^1}$ i $\overline{\Delta e_{zb}^0}$.

Wektor straty napięcia powinien mieć kierunek wektora prądu, który tę stratę wywołał. Prąd I^1 , na wykresie wektorowym jest skierowany ku górze, a więc stratę $\overline{\Delta e_{bz}^1}$ należy brać również ku górze w kierunku od c do g , a stratę $\overline{\Delta e_{zb}^0}$ — od b do z (a nie od z do b !):

$$\overline{zc} + \overline{cg} + \overline{bz} = \overline{bg} \quad \text{czyli} \quad \overline{e_z^1} + \overline{\Delta e_{bz}^1} + \overline{\Delta e_{zb}^0} = \overline{e_b^1}.$$

Odcinek bz ; fazy 2 i 3. W przewodach 2 i 3 nie ma prądu. Jedynie tylko w przewodzie 0 płynie prąd I^1 i wywołuje stratę $\overline{\Delta e_{zb}^0}$ (odcinek \overline{bz}). Obieg prądu idzie zgodnie ze strzałką prądu I^1 , podaną na rysunku, a więc do napięcia e_s^2 wzgl. e_s^3 należy dodać stratę $\overline{\Delta e_{zb}^0}$ w postaci wektora \overline{bz} (kierunek tego wektora tak, jak poprzednio, — ku górze!):

$$\begin{aligned} \overline{zd} + \overline{bz} &= \overline{bd} \\ \overline{zf} + \overline{bz} &= \overline{bf} \end{aligned} \quad \text{czyli} \quad \begin{aligned} \overline{e_s^2} + \overline{\Delta e_{zb}^0} &= \overline{e_b^2} \\ \overline{e_s^3} + \overline{\Delta e_{zb}^0} &= \overline{e_b^3}. \end{aligned}$$

Odcinek ab ; faza 2. Prąd I^2 , odbierany w punkcie b , opóźnia się względem napięcia e_b^2 o kąt φ_b . Kreślimy wektor tego prądu. W przewodzie 0 prąd I^2 dodaje się geometrycznie do prądu I^1 i daje prąd I_{ba}^0 :

$$\overline{I^2} + \overline{I^1} = \overline{I_{ba}^0}.$$

W przewodzie 2 prąd I^2 daje stratę napięcia $\overline{\Delta e_{ab}^2} = I^2 r_{ab}^2$, a w przewodzie 0 prąd I_{ba}^0 daje stratę $\overline{\Delta e_{ba}^0} = I_{ba}^0 r_{ba}^0$. Ze względu na przejrzystość wykresu odkładamy pierwszą stratę ... $\overline{\Delta e_{ab}^2}$ u szczytu wektora \overline{bd} w postaci odcinka \overline{dk} (równoległego do I^2), a drugą stratę ... $\overline{\Delta e_{ba}^0}$ u podnóża, w postaci odcinka \overline{ab} .

Aby znaleźć napięcie, panujące w punkcie a , rozpatrujemy obieg prądu w przewodach 2 i 0. Obieg prądu idzie zgodnie ze strzałkami prądów: I^2 , I_{ba}^0 , a więc do napięcia e_b^2 należy dodać geometrycznie obie straty: $\overline{\Delta e_{ab}^2}$, $\overline{\Delta e_{ba}^0}$. Prąd I^2 na wykresie wektorowym jest skierowany na dół, a więc stratę $\overline{\Delta e_{ab}^2}$ należy brać również na dół, od d do k . Prąd I_{ba}^0 jest skierowany na prawo, a więc stratę $\overline{\Delta e_{ba}^0}$ należy brać od a do b (a nie od b do a !):

$$\overline{bd} + \overline{dk} + \overline{ab} = \overline{ak} \quad \text{czyli} \quad \overline{e_b^2} + \overline{\Delta e_{ab}^2} + \overline{\Delta e_{ba}^0} = \overline{e_a^2}.$$

Odcinek ab ; faza 1. W przewodzie 1 płynie prąd I^1 i daje stratę napięcia $\overline{\Delta e_{ab}^1} = I^1 r_{ab}^1$, a w przewodzie 0 płynie prąd I_{ba}^0 i daje, jak wyżej, stratę $\overline{\Delta e_{ba}^0}$. Pierwszą stratę przedstawia wektor \overline{gh} (kierunek od g do h), a drugą — wek-

tor ab (kierunek od a do b). Obieg prądu idzie zgodnie ze strzałkami prądów: I^1 , I_{ba}^0 , a więc

$$\overset{\wedge}{bg} + \overset{\wedge}{gh} + \overset{\wedge}{ab} = \overset{\wedge}{ah} \quad \text{czyli} \quad \overset{\wedge}{e_b^1} + \overset{\wedge}{\Delta e_{ab}^1} + \overset{\wedge}{\Delta e_{ba}^0} = \overset{\wedge}{e_a^1}.$$

Odcinek ab ; faza 3. W przewodzie 3 nie ma prądu, a w przewodzie 0 płynie prąd I_{ba}^0 i daje, jak wyżej, stratę Δe_{ba}^0 . Obieg prądu idzie zgodnie ze strzałką prądu I_{ba}^0 , a więc

$$\overset{\wedge}{bf} + \overset{\wedge}{ab} = \overset{\wedge}{af} \quad \text{czyli} \quad \overset{\wedge}{e_b^3} + \overset{\wedge}{\Delta e_{ba}^0} = \overset{\wedge}{e_a^3}.$$

Z wykresu wynika, że w fazie 3-ej nieobciążonej nastąpił zysk napięcia.

Dla łatwiejszej budowy wykresu założyliśmy, że na krańcu toru panuje równość napięć i przekonaaliśmy się, że $e_a^1 > e_a^2 > e_a^3$. W rzeczywistości równość napięć będzie na początku toru (u źródła), a wobec tego na krańcu wypadną napięcia nierówne: $e_a^3 > e_a^2 > e_a^1$.

Aby zbadać wpływ zmiany obciążenia na napięcie, wróćmy do najprostszego przykładu — toru trójprzewodowego, obciążonego tylko na krańcu, bezindukcyjnie, w układzie trójkątowym. Zaczniemy od momentu, w którym wszystkie trzy fazy są obciążone jednakowo największym prądem dopuszczalnym (rys. 141):

$$j^{12} = j^{23} = j^{31} = j_{\text{dow.}}$$

Kreśląc różnice geometryczne tych prądów fazowych, znajdziemy prądy przewodowe:

$$\overline{oa} = I^1 \quad \overline{ob} = I^2 \quad \overline{oc} = I^3.$$

Dla większej przejrzystości wykres będziemy budowali inaczej, niż dotychczas, mianowicie nie będziemy podawali całych napięć, lecz ograniczymy się na samych tylko stratach napięcia. Oporności wszystkich trzech przewodów r są jednakowe, a więc i straty napięcia w przewodach (innymi słowy, straty umyślnego napięcia gwiazdowego) Δe będą jednakowe. Dla wołtażu dobieramy taką skalę, aby wektory prądów I były jednocześnie wektorami strat Δe :

$$\overline{oa} = \overline{\Delta e^1} \quad \overline{ob} = \overline{\Delta e^2} \quad \overline{oc} = \overline{\Delta e^3}.$$

Różnice geometryczne strat w każdym dwóch przewodach dadzą stratę napięcia międzyprzewodowego $\overline{\Delta E}$. Na wykresie będą to boki trójkąta abc :

$$\overline{ab} = \overline{\Delta E^{12}} \quad \overline{bc} = \overline{\Delta E^{23}} \quad \overline{ca} = \overline{\Delta E^{31}}.$$

$$\Delta u^{12} = \Delta u^1 - \Delta u^2 = \overline{ab}$$

$$\Delta u^{23} = \Delta u^2 - \Delta u^3 = \overline{bc}$$

Jedną z faz, przypuśćmy 23, będziemy stopniowo odciążali. Najpierw zmniejszymy obciążenie do połowy (rys. 142):

$$j^{23} = 1/2 j_{dzw} \quad j^{12} = j^{31} = j_{dzw}$$

Prądy przewodowe, zasilające fazę 23, mianowicie I^2, I^3 zmniejszą się, natomiast prąd I^1 pozostanie tej samej wartości, co poprzednio. Straty napięcia gwiazdowego Δe ulegną takim samym zmianom:

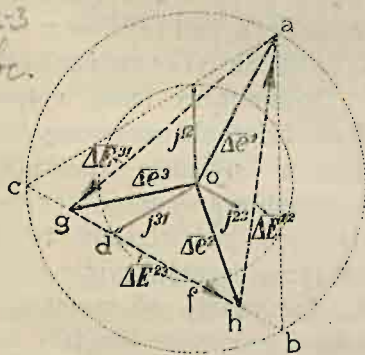
$$oa = I^1 = \Delta e^1 \quad oh = I^2 = \Delta e^2$$

$$og = I^3 = \Delta e^3$$

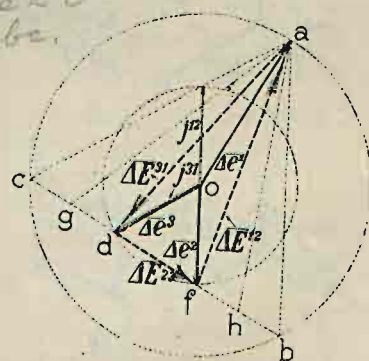
Boki trójkąta ahg przedstawiają wartość strat napięcia międzyprzewodowego ΔE :

$$ah = \Delta E^{12} \quad hg = \Delta E^{23} \quad ga = \Delta E^{31}$$

W fazie 23, którą odciążyliśmy częściowo, strata zmniejszyła się dość znacznie, ale i w dwu sąsiednich fazach nastąpiła pewna redukcja strat.



Rys. 142.



Rys. 143.

Wreszcie, obciążenie fazy 23 zносimy całkowicie (rys. 143):

$$j^{23} = 0 \quad j^{12} = j^{31} = j_{dzw}$$

Prądy przewodowe, dopływające do fazy odciążonej, jeszcze bardziej się zmniejszą, tylko prąd I^1 pozostanie o wartości pierwotnej. Takie same zmiany zajdą w stratach napięcia gwiazdowego:

$$oa = I^1 = \Delta e^1 \quad of = I^2 = \Delta e^2 \quad od = I^3 = \Delta e^3.$$

Boki trójkąta afd dadzą wartość strat napięcia międzyprzewodowego:

$$af = \Delta E^{12} \quad fd = \Delta E^{23} \quad da = \Delta E^{31}.$$

Straty te zmniejszyły się we wszystkich trzech fazach, najbardziej jednak zmniejszyły się w fazie odciążonej.

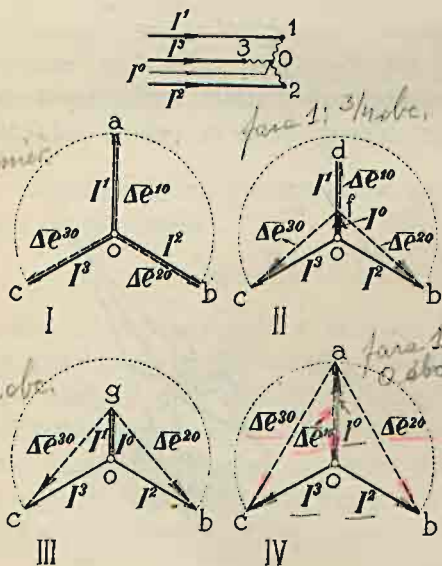
Zmiany obciążenia jednej z faz rozpatrywaliśmy w trzech etapach i za każdym razem straty napięcia międzyprzewodowego otrzymywaliśmy w postaci boków trójkąta. Jak widać z rys. 143, wszystkie te trzy trójkąty miały wspólny wierzchołek a i opierały się na wspólnej linii podstawowej cb . Straty w fazach o zmiennym obciążeniu wahały się w granicach od eb do df , a w fazach sąsiednich — od ac do ad i od ab do af .

Wpływ wzajemny faz sąsiednich jest z tego wykresu zupełnie widoczny. Widzimy także, że w układzie trójkątowym największe straty napięcia międzyprzewodowego wypadają przy największym obciążeniu, jednakowo we wszystkich trzech fazach.

Prześledzimy teraz wpływ zmian obciążenia na stratę napięcia w układzie gwiazdowym. Wyobrażamy sobie tor czteroprzewodowy, obciążony tylko na krańcu, bezindukcyjnie (rys. 144). Zaczynamy od momentu, w którym wszystkie trzy fazy są obciążone jednakowo największym prądem dopuszczalnym (rys. 144 - I):

$$I^1 = I^2 = I^3 = I_{d210}.$$

W przewodzie obojętnym wcale nie będzie prądu, a wobec tego



Rys. 144.

straty napięcia fazowego będą we wszystkich trzech fazach jednakowe. Dobieramy taką skalę, aby wektory prądów były jednocześnie wektorami strat:

$$oa = I^1 = \Delta e^{10} \quad \overline{ob} = I^2 = \Delta e^{20} \quad \overline{oc} = I^3 = \Delta e^{30}.$$

2) Zmniejszamy obciążenie fazy 1-ej do $\frac{3}{4}$ pierwotnej wartości (rys. 144-II):

$$\overline{od} = I^1 = \frac{3}{4} I_{dzw} \quad \overline{ob} = I^2 = I_{dzw} \quad \overline{oc} = I^3 = I_{dzw}.$$

W przewodzie obojętnym popłynie prąd I^0 o wartości $\frac{1}{4} I_{dzw}$. Ponieważ w przykładzie niniejszym oznaczyliśmy prąd I^0 w kierunku, zgodnym z prądami: I^1, I^2, I^3 , przeto wektor prądu I^0 musi mieć kierunek od o do f , aby geometryczna suma wszystkich zbiegających się prądów równała się zeru:

$$\hat{I}^1 + \hat{I}^2 + \hat{I}^3 + \hat{I}^0 = 0.$$

A więc wektor

$$of = I^0 = \frac{1}{4} I_{dzw}.$$

Przypuśćmy, że przekrój przewodu obojętnego równa się przekro-
jowi przewodu skrajnego. •Wektory prądów będą jednocześnie wektorami
przewodowych strat napięcia:

$$\overline{od} = \Delta e^1 \quad \overline{ob} = \Delta e^2 \quad \overline{oc} = \Delta e^3 \quad \overline{of} = \Delta e^0.$$

Obieg prądu w fazie 1-ej prowadzi przez przewód 1-wszy w kierunku prądu I^1 i przez przewód 0-owy w kierunku przeciwnym prądowi I^0 . Aby znaleźć stratę napięcia fazowego, trzeba odjąć geometrycznie stratę w przewodzie 0-wym ... Δe^0 od straty w przewodzie 1-ym. To samo tyczy się innych faz. Wektory fazowych strat napięcia będą następujące:

$$\overline{fd} = \Delta e^{10} \quad \overline{fb} = \Delta e^{20} \quad \overline{fc} = \Delta e^{30}.$$

A więc, strata napięcia w fazie 1-ej zmalała do połowy, a w fazach są-
siednich wzrosła.

3) Następnie zmniejszamy obciążenie fazy 1-ej do połowy (rys. 144-III). W przewodzie obojętnym popłynie prąd również o wartości $\frac{1}{2} I_{dzw}$. Wektory prądów będą jednocześnie wektorami strat napięcia w prze-
wodach:

$$\overline{og} = I^1 = \frac{1}{2} I_{dzw} = \Delta e^1; \quad \overline{ob} = I^2 = I_{dzw} = \Delta e^2; \quad \overline{oc} = I^3 = I_{dzw} = \Delta e^3;$$

$$og = I^0 = \frac{1}{2} I_{dzw} = \Delta e^0.$$

Wektory, wychodzące z punktu g , będą wyobrażały straty napięcia fazowego:

$$\overline{gb} = \overline{\Delta e^{20}} \quad \overline{gc} = \overline{\Delta e^{30}} \quad \overline{gg} = \overline{\Delta e^{10}} = 0.$$

W fazie 1-ej wcale niema straty napięcia, a w fazie 2-ej i 3-ej strata jeszcze bardziej wzrosła.

Wreszcie znosimy całkowicie obciążenie fazy 1-ej (rys. 144-IV). W przewodzie obojętnym popłynie prąd I_{dzw} . Prądy, a zarazem przewodowe straty napięcia, będą się wyrażały wektorami:

$$\overline{oo} = I^1 = \overline{\Delta e^1} = 0 \quad \overline{ob} = I^2 = \overline{\Delta e^2} \quad \overline{oc} = I^3 = \overline{\Delta e^3} \quad \overline{oa} = I^0 = \overline{\Delta e^0},$$

a straty napięcia fazowego:

$$\overline{ab} = \overline{\Delta e^{20}} \quad \overline{ac} = \overline{\Delta e^{30}} \quad \overline{ao} = \overline{\Delta e^{10}}.$$

W fazie 1-ej strata napięcia w przypadku IV (rys. 144-IV) w porównaniu z przypadkiem I (rys. 144-I) jest tej samej wartości, lecz zmieniła kierunek: tam była stratą, tu będzie zyskiem napięcia. W fazach sąsiednich: 2-iej i 3-ciej strata napięcia jeszcze bardziej się powiększyła.

Odciążanie jednej fazy spowodowało w tej fazie zmniejszanie się straty, a następnie przejście ze straty w zysk napięcia. W fazach sąsiednich strata napięcia wzrastała do wartości $\sqrt{3}$ razy większej od straty napięcia, która była przy największym obciążeniu, lecz jednakowo we wszystkich fazach. Gdyby przekrój przewodu obojętnego był mniejszy od przekroju przewodu skrajnego, to zysk napięcia w fazie odciążonej i straty napięcia w fazach sąsiednich wystąpiłyby jeszcze w większym stopniu, niż w naszym przykładzie.

Dochodzimy zatem do wniosku, że w układzie gwiazdowym największe straty napięcia fazowego występują nie przy największym obciążeniu wszystkich trzech faz, jak w układzie trójkątowym, lecz przy niejednakowym obciążeniu tych faz. Zyski napięcia mogą powstawać również tylko przy niejednakowym obciążeniu faz.

Powyższą charakterystykę wyprowadziliśmy z przykładu toru najprostszego, obciążonego opornościowo (bezindukcyjnie). W torach bardziej złożonych i przy obciążeniu indukcyjnym lub pojemnościowym wykresy wypadają bardziej zawile, ale tendencja zmian straty napięcia pozostaje w zasadzie ta sama.

Przykłady na obliczenie rozpiętych prądów i spadków napięcia przy

<i>Gdy dwie fazy są całkowicie obciążone, a trzecią fazę odcinamy stopniowo do zera, to</i>	<i>w układzie trójkątowym</i>	<i>w układzie gwiazdowym</i>
<i>strata napięcia w tej fazie</i>	<i>zmniejsza się, lecz nie dochodzi do zera</i>	<i>zmniejsza się, osiąga zero, staje się wartością ujemną czyli zyskiem</i>
<i>strata napięcia w fazach sąsiednich</i>	<i>zmniejsza się nieco</i>	<i>zwiększa się znacznie</i>
<i>największa strata napięcia wypada wówczas,</i>	<i>gdy wszystkie fazy mają obciążenie największe</i>	<i>gdy w fazie sąsiedniej obciążenie spadnie do zera</i>
<i>a największy zysk napięcia wypadnie wówczas,</i>	<i>nie zdarza się</i>	<i>gdy w tej fazie obciążenie spadnie do zera.</i>

nierównem obciążeniu faz rozwiązujemy wykreślnie na wzór przykładu 61-go.

§ 48. Obliczanie przekroju.

Tory trójfazowe z fazami obciążonemi jednakowo. Zgodnie z zasadą, podaną w § 46, wydzielamy jeden z przewodów i traktujemy go wraz z napięciem gwiazdowym, jak przewód prądu jednofazowego. Do takiego przewodu możemy zastosować wzory prądu jednofazowego z tą tylko zmianą, że, zamiast napięcia międzyprzewodowego E , wprowadzimy podwójne napięcie e , panujące między każdym przewodem a punktem obojętnym (np. ziemią). Innymi słowy, dzielimy napięcie robocze prądu jednofazowego na dwie połowy:

$$E = 2e \quad \Delta E = 2\Delta e. \quad (a)$$

W układzie trójfazowym e będzie napięciem gwiazdowym, a Δe — spadkiem napięcia gwiazdowego.

Aby obliczyć tor z wieloma odbiorami na dopuszczalny spadek napięcia gwiazdowego Δe_{dzw} i na przekrój jednostajny, zastosujemy wzór (94), wprowadzając $2\Delta e_{dzw}$, zamiast ΔE_{dzw} :

$$s \approx \frac{2}{k \cdot 2 \Delta e_{dzw}} \sum_a^n \pm (i_p \cos \varphi_p) l_{ps}. \quad (b)$$

Do tego samego wyniku dojdziemy, odwracając wzór (115).

W układzie gwiazdowym Δe_{dzw} jest spadkiem napięcia oświetleniowego, w układzie zaś trójkątowym — jest spadkiem umyślnego napięcia gwiazdowego. Spadek napięcia w układzie trójkątowym ΔE_{dzw} jest $\sqrt{3}$ razy większy od Δe_{dzw} (wzór 116). Wobec tego wzór (b) można przedstawić w formie następującej:

$$\left| s \approx \frac{1}{k \Delta e_{dzw}} \sum_a^n \pm (i_p \cos \varphi_p) l_{ps} = \frac{\sqrt{3}}{k \Delta E_{dzw}} \sum_a^n \pm (i_p \cos \varphi_p) l_{ps} \right| \quad (121)$$

(sumowanie momentami; + zasilanie, — odbiór).

W obliczaniu na spadek napięcia kierujemy się rozplywem prądów wiatowych, w obliczaniu zaś na stratę mocy — rozplywem prądów rzeczywistych. We wzorze (95), wyprowadzonym dla prądu jednofazowego, zmieni się obecnie tylko współczynnik liczbowy „2” na „3”, wobec zwiększonej liczby przewodów czynnych:

$$s \approx \frac{3}{k \Delta P_{dzw}} \sum_a^n I_{pr}^2 l_{pr} \quad (\text{sumowanie odcinkami}). \quad (122)$$

Wzór ten wpływa zresztą z równania (117).

Porównajmy przekroje jednoodcinkowego toru jednofazowego i trójfazowego przy tej samej długości toru l , tem samem napięciu międzyprzewodowem E i przy jednakowej mocy obciążenia:

$$E I \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot E \left(\frac{I}{\sqrt{3}} \right) \cos \varphi.$$

Przypadek 1-szy — przekroje liczone na dopuszczalny spadek napięcia ΔE_{dzw} . Przekrój w torze jednofazowym wypadnie:

$$s_1 = \frac{2}{k \Delta E_{dzw}} (I \cos \varphi) l,$$

a w trójfazowym —

$$s_2 = \frac{1}{k \Delta e_{dzw}} \left(\frac{I}{\sqrt{3}} \cos \varphi \right) l = \frac{\sqrt{3}}{k \Delta E_{dzw}} \left(\frac{I}{\sqrt{3}} \cos \varphi \right) l = \frac{1}{k \Delta E_{dzw}} (I \cos \varphi) l.$$

Przypadek 2-gi — przekroje liczone na dopuszczalną stratę mocy ΔP_{dzw} . Przekrój w torze jednofazowym wyniesie:

$$s_1 = \frac{2}{k \Delta P_{dzw}} I^2 l,$$

a w trójfazowym —

$$s_2 = \frac{3}{k \Delta P_{dzw}} \left(\frac{I}{\sqrt{3}} \right)^2 l = \frac{1}{k \Delta P_{dzw}} I^2 l.$$

A zatem przekroje w torach trójfazowych wypadają w obu przypadkach 2 razy mniejsze, niż w jednofazowych przy tem samym napięciu międzyprzewodowym.

Przykład 62. Tor trójfazowy trójprzewodowy, ten sam, co w przykładzie 60-ym (rys. 138). Napięcie międzyprzewodowe w punktach zasilających 120 V. Obliczyć przekroje: 1) na 6% dopuszczalnego spadku napięcia i 2) na 6% dopuszczalnej straty mocy.

1. Obliczenie na spadek napięcia $\Delta E_{dzw} = 0,06 \cdot 120 = 7,2$ V.

Wydzielamy jeden przewód i obliczamy go na spadek napięcia gwiazdowego:

$$\Delta e_{dzw} = \frac{7,2}{\sqrt{3}} = 4,15 \text{ V.}$$

Rozpływ prądów watowych w tym przewodzie podaje rys. 125-I. Punkt spływu c dzieli przewód zamknięty na dwa przewody otwarte. Obliczamy jeden z tych przewodów np. $a_1 c$:

$$s = \frac{1}{57 \cdot 4,15} (24,26 \cdot 130 - 14 \cdot 60) = 9,8 \approx 10 \text{ mm}^2.$$

2. Obliczenie na stratę mocy (rys. 138):

$$\Delta P_{dzw} = \frac{0,06}{1 - 0,06} (2810 + 5619 + 1806) = 653 \text{ W.}$$

Rozpływ prądów rzeczywistych podaje rys. 125-III;

$$s = \frac{3}{57 \cdot 653} (24,57^2 \cdot 70 + 14,55^2 \cdot 60 + 20,52^2 \cdot 40 + 26,75^2 \cdot 60) = 9,3 \approx 10 \text{ mm}^2.$$

Tory trójfazowe nierozgałęzione i rozgałęzione oblicza się na spadek napięcia i na najmniejszą objętość również przez wydzielenie jednego przewodu o napięciu gwiazdowym i wg tych samych wzorów: (96), (97), (98) i (99), co tory jednofazowe.

Przykład 63. Tor trójfazowy ten sam, co w przykładzie 60-ym i 62-im (rys. 138), obliczyć na 7,2 V dopuszczalnego spadku napięcia i na najmniejszą objętość.

Wydzielamy jeden przewód i obliczamy go na spadek napięcia gwiazdowego

$$\Delta e_{dzw} = \frac{7,2}{\sqrt{3}} = 4,15 \text{ V}.$$

Opierając się na rozplywie prądów watowych (rys. 125-I), przecinamy przewód w punkcie spływu c. Lewa część przewodu a_1c składa się z dwóch odcinków. Zastępujemy odcinek krańcowy $b\bar{c}$ odcinkiem umyślonym o długości:

$$\lambda = \sqrt{\frac{10,26 \cdot 60^2}{24,26}} = 39 \text{ m},$$

obliczamy przekrój pierwszego odcinka a_1b :

$$s_{a,b} = \frac{24,26 (70 + 39)}{57 \cdot 4,15} = 11,2 \approx 16 \text{ mm}^2,$$

spadek napięcia w tym odcinku wyniesie:

$$\Delta e_{a,b} = \frac{24,26 \cdot 70}{57 \cdot 16} = 1,87 \text{ V},$$

a przekrój w odcinku $b\bar{c}$:

$$s_{b\bar{c}} = \frac{10,26 \cdot 60}{57 (4,15 - 1,87)} = 4,8 \approx 6 \text{ mm}^2.$$

W ten sam sposób należałoby obliczyć przekroje dla prawej części przewodu a_2c .

Przechodzimy do obliczania na g o s p o d a r n o ść. Roczne koszty przesyłania prądu torami trójfazowymi K , wobec zwiększonej liczby przewodów, będą się wyrażały wzorem z innymi współczynnikami liczbowymi („3“, zamiast „2“), niż wzór (59):

$$K = \underbrace{3l \frac{p_p}{100} as}_{\% \text{ kosztu przewodów}} + \underbrace{\frac{p_p}{100} (3lc + C)}_{\% \text{ kosztu elektrowni}} + \underbrace{\frac{3l}{k s} (I_{\max})^2 \left(\frac{p_e}{100} b + \beta T \right)}_{\text{koszt prądu}}. \quad (123)$$

Wzory (60) i (61) na obliczanie torów pojedynczych pozostaną te same, co w prądzie stałym i jednofazowym. Litera I będzie oznaczała nadal rzeczywisty prąd przewodowy. Natomiast wzór na gospodarczo najkorzystniejszy spadek napięcia dla kilku torów zasilających (dla prądów stałych — 65, a dla jednofazowych — 101) będzie miał postać zmienioną.

Koszta przesyłania prądu K , po podstawieniu:

$$s = \frac{(I \cos \varphi_a) l_a}{k \Delta e}$$

do wzoru (123), wyrażą się równaniem następującym (por. wzór 64 i 100):

$$K = \frac{3 n_p^2}{k^2 \Delta e} \sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} (I_\alpha \cos \varphi_\alpha) l_\alpha^2 + \frac{p_p}{100} \left(3c \sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} l_\alpha + n C \right) + \Delta e n_e^2 \sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} \frac{I_\alpha}{\cos \varphi_\alpha} \quad (124)$$

Stąd otrzymamy wzór gospodarczo najkorzystniejszego spadku napięcia gwiazdowego. Spadek napięcia międzyprzewodowego będzie $\sqrt{3}$ razy większy:

$$\Delta e_k = \frac{1 n_p}{k n_e} \lambda; \quad \Delta E_k = \frac{\sqrt{3} \cdot n_p}{k n_e} \lambda; \quad \lambda = \sqrt{\frac{\sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} (I_\alpha \cos \varphi_\alpha) l_\alpha^2}{\sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} \frac{I_\alpha}{\cos \varphi_\alpha}}} \quad (125)$$

Przykład 64. Miejska sieć rozsyłowa trójfazowa, trójprzewodowa otrzymuje prąd za pośrednictwem sześciu punktów zasilających (rys. 118), z których jeden znajduje się w elektrowni, a pozostałe łączą się z elektrownią trójżyłowymi kablami podziemnymi. Napięcie robocze 220 V. Obliczyć przekroje kabli.

Tor I o długości 0 m jest obciążony 37,5 kW przy $\cos \varphi = 0,75$

" II " 1400 " " 53 " " " = 0,82

" III " 1700 " " 48,5 " " " = 0,77

" IV " 750 " " 88 " " " = 0,80

" V " 1600 " " 84 " " " = 0,82

" VI " 2050 " " 40 " " " = 0,85

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

$$k = 57 \frac{\text{m}}{\Omega \text{mm}^2}; \quad a = 0,027 \text{ Złp.}$$

Spółczynniki gospodarcze:

$$n_e = \sqrt{0,1142 \cdot 2 + 0,00025 \cdot 1670} = 0,802; \quad n_p = \sqrt{0,1036 \cdot 0,027 \cdot 57} = 0,398.$$

Prądy przewodowe:

$$I_I = \frac{37500}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,75} = 132 \text{ A}, \quad I_{II} = 170 \text{ A}, \quad I_{III} = 166 \text{ A}, \quad I_{IV} = 290 \text{ A},$$

$$I_V = 270 \text{ A}, \quad I_{VI} = 124 \text{ A}.$$

Długość umyślona:

$$132 \cdot 0,75 \cdot 0 + 170 \cdot 0,82 \cdot 1400^2 + 166 \cdot 0,77 \cdot 1700^2 + 290 \cdot 0,80 \cdot 750^2 + \\ + 270 \cdot 0,82 \cdot 1600^2 + 124 \cdot 0,85 \cdot 2050^2 = 1782840000$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{1782840000}{\frac{132}{0,75} + \frac{170}{0,82} + \frac{166}{0,77} + \frac{290}{0,80} + \frac{270}{0,82} + \frac{124}{0,85}}} = 1113 \text{ m}.$$

Spadek napięcia gwiazdowego gospodarczo najkorzystniejszy:

$$\Delta e_k = \frac{0,398 \cdot 1113}{57 \cdot 0,802} = 9,7 \text{ V}.$$

Przekroje gospodarczo najkorzystniejsze:

$$s_{II} = \frac{170 \cdot 0,82 \cdot 1400}{57 \cdot 9,7} = 352 \approx 400 \text{ mm}^2, \quad s_{III} = 392 \approx 400 \text{ mm}^2,$$

$$s_{IV} = 315 \approx 300 \text{ mm}^2, \quad s_V = 638 \approx 2 \times 300 \text{ mm}^2, \quad s_{VI} = 392 \approx 400 \text{ mm}^2.$$

Średni rzeczywisty spadek napięcia gwiazdowego wyniesie:

$$\Delta e = \frac{1}{57 \cdot 5} \left(\frac{170 \cdot 0,82 \cdot 1400}{400} + \frac{166 \cdot 0,77 \cdot 1700}{400} + \frac{290 \cdot 0,8 \cdot 750}{300} + \frac{270 \cdot 0,82 \cdot 1600}{600} + \right. \\ \left. + \frac{124 \cdot 0,85 \cdot 2050}{400} \right) \approx 9,6 \text{ V}.$$

Każdy z trzech przewodów, doprowadzających prąd do punktu zasilającego w elektrowni, powinien być zaopatrzony w opornik, któryby dla równości napięcia w sieci niweczył 9,6 V przy 132 A i przy $\cos \varphi = 0,75$. Oporność każdego opornika ma wynieść:

$$\frac{9,6}{132 \cdot 0,75} = 0,097 \ \Omega.$$

Spadek napięcia międzyprzewodowego wyniesie:

$$\Delta E = \sqrt{3} \cdot 9,6 = 16,6 \text{ V},$$

a wobec tego napięcie w elektrowni trzeba będzie regulować w granicach od 220 do 236,6 V.

Wreszcie obliczanie na nagrzewanie i na wytrzymałość mechaniczną pozostaje takie, jak dla prądu stałego lub jednofazowego.

Tory trójfazowe z fazami obciążeniami niejednakowo. Sieci, które byłyby zawsze jednakowo obciążone we wszystkich trzech fazach, należą do rzadkości. Do kategorii tej można zaliczyć tylko takie sieci, które pracują wyłącznie na odbiorniki trójfazowe, a więc np. silniki. Zazwyczaj jednak z sieci trójfazowej czerpią prąd rozmaite odbiorniki, tak trójfazowe (silniki trójfazowe), jak i jednofazowe (silniki jednofazowe, lampy, ogrzewacze i t. d.). W tych warunkach nieuniknione są momenty nierównowagi w obciążeniu faz. Stopień nierównomierności i długo-trwałość nierównowagi zależy od warunków miejscowych.

W układzie trójkątowym możemy się nie liczyć z nierównowagą obciążeń. Spadki napięcia osiągają maximum przy największym obciążeniu, rozłożonem równomiernie na trzy fazy. A więc, wystarczy

obliczyć przekroje na to obciążenie, aby mieć pewność, że przepisany największy spadek dopuszczalny nigdy nie będzie przekroczony.

Inaczej jest z układem gwiazdowym. Najniekorzystniejszym przypadkiem jest tu nierówność obciążeń. Wówczas bowiem występują spadki napięcia większe, niż przy największym obciążeniu równomiernym, a jednocześnie występują wzrosty napięcia, jeszcze groźniejsze od spadków. Wartość spadków i wartość wzrostów zależy od stopnia nierównomierności obciążenia.

Przykład 65. Tor czteroprzewodowy prądu trójfazowego o długości 250 m zasila instalację w układzie gwiazdowym, położoną na krańcu, o mocy 69 kW, $\cos \varphi = 1$ i o napięciu oświetleniowym 3×230 V. Obliczyć przekroje na 5% dopuszczalnego spadku napięcia i 1% — dopuszczalnego wzrostu napięcia dla dwóch przypadków: 1) jedna faza obciążona 25%, a dwie — bez obciążenia i 2) jedna faza obciążona 75%, a dwie — z całkowitem obciążeniem.

Przy obciążeniu całkowitem po przewodach skrajnych płynie prąd:

$$\frac{69\,000}{3 \cdot 230} = 100 \text{ A.}$$

1) W pierwszym przypadku: $I^1 = 25 \text{ A}$; $I^2 = I^3 = 0$; $I^0 = 25 \text{ A}$ (rys. 145-I). W przewodzie obojętnym nastąpi różnica napięć:

$$\Delta e^0 = I^0 \frac{l}{k s^0}.$$

W fazach nieobciążonych 2-ej i 3-ej ta różnica napięć wywoła wzrost napięcia (rys. 145-II).

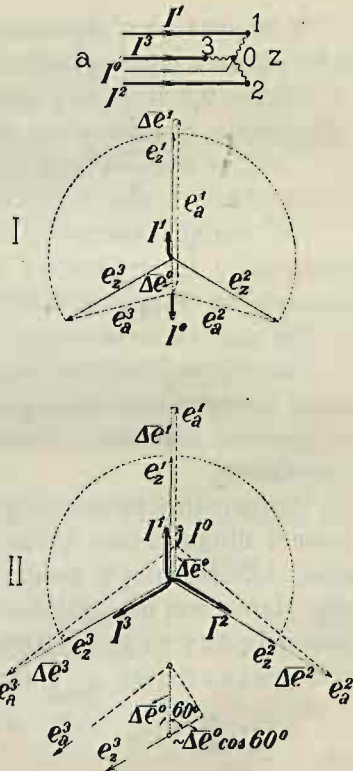
$$-\Delta e^{20} = -\Delta e^{30} \approx \Delta e^0 \cos 60^\circ = \frac{I^0 l}{2 k s^0}.$$

Wyznaczamy dla przekroju przewodu obojętnego taką wartość, aby ten wzrost napięcia nie przekroczył 1% napięcia, czyli 2,3 V:

$$\frac{I^0 l}{2 k s^0} = 2,3 = \frac{25 \cdot 250}{2 \cdot 57 \cdot s^0},$$

stąd

$$s^0 = \frac{25 \cdot 250}{2 \cdot 57 \cdot 2,3} = 24 \approx 25 \text{ mm}^2.$$



Rys. 145.

2) W drugim przypadku: $I^1 = 75 \text{ A}$; $I^2 = I^3 = 100 \text{ A}$; $I^0 = 25 \text{ A}$ (rys. 145-II). Największy spadek napięcia wystąpi w fazach: 2-ej i 3-ej (rys. 145 — szkic dodatkowy u dołu)

$$\Delta e^{20} = \Delta e^{30} \approx \Delta e^3 + \Delta e^0 \cos 60^\circ = \frac{I^3 l}{k s} + \frac{I^0 l}{2 k s^0}.$$

Wyznaczamy dla przekroju przewodów skrajnych taką wartość, aby spadek napięcia nie przekroczył 5% czyli 11,5 V:

$$11,5 = \frac{100 \cdot 250}{57 \cdot s} + \frac{25 \cdot 250}{2 \cdot 57 \cdot 25} = \frac{100 \cdot 250}{57 \cdot s} + 2,2,$$

stąd

$$s = \frac{100 \cdot 250}{57 \cdot (11,5 - 2,2)} = 47 \approx 50 \text{ mm}^2.$$

W powyższym przykładzie przyjęto 25% nierównomierności obciążenia i wskutek tego wypadło liczyć przekroje przewodów skrajnych na $11,5 - 2,2 = 9,3 \text{ V}$ różnicy napięcia, podczas gdy przy równym podziale obciążenia liczonoby na całkowity dopuszczalny spadek napięcia 11,5 V. Im większą przewidujemy nierównomierność, tem bardziej wypada zniżyć różnicę napięcia, traconą w przewodach skrajnych.

Nie znając zmienności obciążenia, przy której będzie pracował projektowany tor trójfazowy i nie wiedząc, jak będzie się rozkładało obciążenie na wszystkie trzy fazy, nie możemy ściśle obliczyć przekrojów. Dla warunków zwykłych —

Obliczamy przekroje przewodów skrajnych na $\frac{3}{4}$ dopuszczalnego spadku napięcia (pozostałą $\frac{1}{4}$ część przeznaczamy na przewód obojętny), a na przekrój przewodu obojętnego wyznaczamy $\frac{1}{2}$ przekroju przewodu skrajnego.

Porównajmy przekroje w układzie trójkątowym i gwiazdowym przy tej samej długości toru l , tem samym napięciu oświetleniowym, tym samym dopuszczalnym spadku napięcia i przy jednakowej mocy obciążenia. Napięciem oświetleniowym w układzie trójkątowym będzie napięcie międzyprzewodowe E_1 , a w układzie gwiazdowym — napięcie gwiazdowe e_2 . Z równości napięć i mocy wynika, że

$$E_1 = e_2 \quad \sqrt{3} \cdot E_1 I_1 \cos \varphi = 3 e_2 I_2 \cos \varphi,$$

stąd

$$\sqrt{3} \cdot I_1 = 3 I_2 \quad I_2 = \frac{I_1}{\sqrt{3}},$$

a z równości spadków napięcia:

$$\Delta E_1 = \sqrt{3} \cdot \Delta e_1 = \Delta e_2.$$

W układzie trójkątowym obliczamy przekroje na prąd I_1 i na dopuszczalny spadek umyślnego napięcia gwiazdowego Δe_1 ...

$$s_1 = \frac{(I_1 \cos \varphi) l}{k \Delta e_1},$$

a w układzie gwiazdowym — na prąd $I_2 = \frac{I_1}{\sqrt{3}}$ i na $\frac{3}{4}$ dopuszczalnego spadku gwiazdowego $\frac{3}{4} \Delta e_2 = \frac{3}{4} (\sqrt{3} \cdot \Delta e_1) \dots$

$$s_2 = \frac{\left(\frac{I_1}{\sqrt{3}} \cos \varphi \right) l}{k \frac{3}{4} (\sqrt{3} \cdot \Delta e_1)} = \frac{4}{9} \cdot \frac{(I_1 \cos \varphi) l}{k \Delta e_1}.$$

A zatem przekroje w układzie gwiazdowym wypadają przy tem samym napięciu oświetleniowym mniejsze, niż w układzie trójkątowym, w stosunku 4:9.

Przykład 66. Tor ten sam, co w przykładzie poprzednim. Obliczyć przekroje na 5% dopuszczalnego spadku napięcia, czyli na 11,5 V.

Na przewód skrajny przeznaczamy $\frac{3}{4}$ tego spadku .. $\frac{3}{4} 11,5 = 8,6$ V....

$$s = \frac{100 \cdot 250}{57 \cdot 8,6} = 51 \approx 50 \text{ mm}^2,$$

a przekrój przewodu obojętnego szacujemy na połowę:

$$s_0 = \frac{1}{2} \cdot 51 = 25,5 \approx 25 \text{ mm}^2.$$

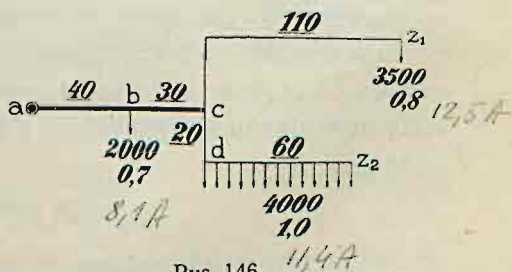
Przykład 67. Tor czteroprzewodowy prądu trójfazowego, rozgałęziony, o napięciu w punkcie zasilającym 120 V i o średnim napięciu oświetleniowym 117 V, zasila w punkcie b (rys. 146) instalację o mocy 2 kW i $\cos \varphi = 0,7$, w punkcie z_1 3,5 kW i $\cos \varphi = 0,8$, wreszcie na długości dz_2 zasila odbiorniki, rozłożone równomiernie o mocy sumarycznej 4 kW, $\cos \varphi = 1$. Obliczyć przekroje na 5% spadku napięcia i na przybliżone minimum objętości.

Obliczamy prądy odbierane:

$$i_b = \frac{2000}{3 \cdot 117 \cdot 0,7} = 8,1 \text{ A}$$

$$i_{z_1} = 12,5 \text{ A}$$

$$\sum_{d=1}^{z_2} i = 11,4 \text{ A}.$$



Rys. 146.

Wydzielamy jeden z przewodów skrajnych i obliczamy go na $\frac{3}{4}$ dopuszczalnego spadku napięcia:

$$\frac{3}{4} \cdot 0,05 \cdot 120 = 4,5 \text{ V.}$$

Zastępujemy gałęzie cz_1 i cz_2 jedną gałęzią umyślną cy o długości:

$$\lambda_{cy} = \frac{12,5 \cdot 0,8 \cdot 110 + 11,4 \cdot 50}{12,5 \cdot 0,8 + 11,4} = 78 \text{ m.}$$

Obliczamy przekroje przewodów skrajnych: 1) na odcinku ac :

$$s_{ac} = \frac{1}{57 \cdot 4,5} \left[8,1 \cdot 0,7 \cdot 40 + (12,5 \cdot 0,8 + 11,4) \cdot 148 \right] = 13,2 \approx 16 \text{ mm}^2,$$

$$\Delta e_{ac} = \frac{1}{57 \cdot 16} \left[8,1 \cdot 0,7 \cdot 40 + (12,5 \cdot 0,8 + 11,4) \cdot 70 \right] = 1,89 \text{ V,}$$

2) na odcinku cz_1 :

$$s_{cz_1} = \frac{1}{57 \cdot (4,5 - 1,89)} \cdot 12,5 \cdot 0,8 \cdot 110 = 7,4 \approx 10 \text{ mm}^2,$$

3) na odcinku cz_2 :

$$s_{cz_2} = \frac{1}{57 \cdot (4,5 - 1,89)} \cdot 11,4 \cdot 50 = 3,8 \approx 4 \text{ mm}^2.$$

Wyznaczamy przekroje przewodów obojętnych:

$$s_{ac}^0 = \frac{1}{2} \cdot 13,2 \approx 10 \text{ mm}^2 \quad s_{cz_1}^0 = \frac{1}{2} \cdot 7,4 \approx 4 \text{ mm}^2 \quad s_{cz_2}^0 = \frac{1}{2} \cdot 3,8 \approx 2,5 \text{ mm}^2.$$

Tory dwufazowe nieskojarzone oblicza się tak, jak dwa tory jednofazowe, niezależne do siebie. W torach skojarzonych przy wyznaczaniu przekroju przyjmuje się jednostajną gęstość prądu dla wszystkich trzech przewodów, a ponieważ prąd powrotny I^0 jest w zasadzie $\sqrt{2}$ razy większy od prądów fazowych I (por. wzór 110), przeto i przekrój przewodu powrotnego s^0 wypada dać $\sqrt{2}$ razy większy od przekroju przewodu skrajnego:

$$s^0 = \sqrt{2} \cdot s. \quad (126)$$

Obliczmy przekroje toru dwufazowego, obciążonego na krańcu jednakowo w obu fazach, na dopuszczalny spadek napięcia ΔE_{dzin} . Spadki napięcia w tym przypadku wyrażają się wzorem (120):

$$\Delta E_{az} = I r \cos \varphi_s + \sqrt{2} \cdot I r^0 \cos (45^\circ \pm \varphi_s).$$

Podstawmy, zamiast r i r^0 , odpowiednie wartości:

$$r = \frac{l}{k s} \quad r^0 = \frac{l}{k s^0} = \frac{l}{k s \sqrt{2}},$$

a otrzymamy:

$$\Delta E_{dz} = \frac{I l}{k s} \cos \varphi_s + \frac{I l}{k s} \cos (45^\circ \pm \varphi_s) = \frac{I [\cos \varphi_s + \cos (45^\circ \pm \varphi_s)] l}{k s}.$$

Znak plus (+) tyczy się jednej fazy, a minus (—) fazy drugiej. Większy spadek napięcia wypada ze znakiem minus, a więc

$$\Delta E_{dzw} = \frac{I [\cos \varphi_s + \cos (45^\circ - \varphi_s)] l}{k s}.$$

Stąd przekrój przewodu skrajnego:

$$s = \frac{I [\cos \varphi_s + \cos (45^\circ - \varphi_s)] l}{k \Delta E_{dzw}}. \quad (127)$$

Dla torów, złożonych z wielu odcinków, wzór (127) można uogólnić przez wprowadzenie do licznika sumy iloczynów, ułożonych, jak wyżej, dla każdego odcinka z osobna:

$$s = \frac{\sum_{\alpha}^z I_{pr} [\cos \varphi_{pr} + \cos (45^\circ - \varphi_{pr})] l_{pr}}{k \Delta E_{dzw}}. \quad (\text{sumowanie odcinkami}). \quad (128)$$

Obliczmy teraz najprostszy tor jednoodcinkowy na dopuszczalną stratę mocy ΔP_{dzw} . Strata mocy wyraża się wzorem:

$$\Delta P_{dz} = 2 I^2 r + (I^0)^2 r^0 = \frac{2 I^2 l}{k s} + \frac{(\sqrt{2} \cdot I)^2 l}{k \sqrt{2} \cdot s} = (2 + \sqrt{2}) \frac{I^2 l}{k s} = \Delta P_{dzw}.$$

Stąd przekrój przewodu skrajnego:

$$s = (2 + \sqrt{2}) \frac{I^2 l}{k \Delta P_{dzw}}. \quad (129)$$

Wzór ten w formie ogólnej dla torów wieloodcinkowych będzie następujący:

$$s = \frac{2 + \sqrt{2}}{k \Delta P_{dzw}} \sum_{\alpha}^z I_{pr}^2 l_{pr}. \quad (130)$$

Porównajmy przekroje jednoodcinkowego toru jednofazowego i dwufazowego przy tej samej długości l , tem samym napięciu oświetleniowym E i przy jednakowej mocy obciążenia bezindukcyjnego:

$$EI = 2E\left(\frac{I}{2}\right).$$

Przypadek 1-szy — przekroje liczone na dopuszczalny spadek napięcia ΔE_{dzw} . Przekrój w torze jednofazowym wypadnie:

$$s_1 = 2 \frac{Il}{k \Delta E_{dzw}},$$

a przekrój przewodu skrajnego w torze dwufazowym:

$$s_2 = \frac{\frac{I}{2}(1 + \cos 45^\circ)l}{k \Delta E_{dzw}} = 0,85 \frac{Il}{k \Delta E_{dzw}}.$$

Przypadek 2-gi — przekroje liczone na dopuszczalną stratę mocy ΔP_{dzw} . Przekrój w torze jednofazowym wyniesie:

$$s_1 = 2 \frac{I^2 l}{k \Delta P_{dzw}},$$

a przekrój przewodu skrajnego w torze dwufazowym:

$$s_2 = (2 + \sqrt{2}) \frac{\left(\frac{I}{2}\right)^2 l}{k \Delta P_{dzw}} = 0,85 \frac{I^2 l}{k \Delta P_{dzw}}.$$

A zatem przekroje przewodów skrajnych w torach dwufazowych przy tem samym napięciu oświetleniowym wypadają w obu przypadkach mniejsze, niż w jednofazowych, w stosunku 0,85 : 2.

§ 49. Projektowanie sieci.

Sieci trójfazowe oblicza się w takiej samej kolejności, jak jednofazowe (§ 44). Zaczynamy od ustalenia mocy wszystkich odbiorników, przyłączonych do sieci. Nie zdarza się nigdy, aby wszystkie odbiorniki pracowały naraz. Stosunek największego obciążenia pewnej instalacji lub całej sieci do mocy wszystkich odbiorników nazywa się stopniem jednoczesności. Zależnie od charakteru instalacji stopień jednoczesności bywa mniejszy lub większy. Opierając się na statystyce istniejących urządzeń

elektrycznych, można dość dokładnie oszacować te współczynniki dla rozmaitych grup instalacyj (fabryki, warsztaty, sklepy, mieszkania i t. d.) i tym sposobem obliczyć największą przewidywaną moc odbiorczą sieci wtórnej P_2 .

Wzory, wyrażające przybliżoną zależność między liczbą transformatorów N_2 a ryczałtowym przekrojem przewodów sieci wtórnej s_2 , dla prądu trójfazowego będą się różniły od wzorów dla prądu jednofazowego (104), (105) tylko współczynnikami liczbowymi:

$$s_2 = 0,75 \frac{P_2 S_2}{k_2 6 e_2 \Delta e_2 (\Sigma l_2)} \sqrt[4]{\frac{n_2}{N_2^5}} = 0,75 \frac{P_2 S_2}{k_2 2 E_2 \Delta E_2 (\Sigma l_2)} \sqrt[4]{\frac{n_2}{N_2^5}} \quad (131)$$

$$N_2 = \sqrt[5]{\left(\frac{0,75 P_2 S_2}{k_2 s_2 6 e_2 \Delta e_2 (\Sigma l_2)} \right)^4 n_2} = \sqrt[5]{\left(\frac{0,75 P_2 S_2}{k_2 s_2 2 E_2 \Delta E_2 (\Sigma l_2)} \right)^4 n_2} \quad (132)$$

Oznaczenia pozostały te same, co poprzednio: P_2 wyraża moc wszystkich trzech faz, e_2 — napięcie gwiazdowe, a E_2 — międzyprzewodowe.

Chcąc ustalić liczbę transformatorów gospodarczo najkorzystniejszą, należy obliczyć dla rozmaitych przekrojów s_2 sumę dwóch pozycji kosztorysowych, zależnych od liczby transformatorów, wg wzoru:

$$F_2' = a_2 [3 (\Sigma l_2) s_2] + N_2 f \quad (133)$$

kioski, montaż, część transformatora i przyrządów
miedź w sieci wtórnej

Wzór ten jest ważny dla sieci trójprzewodowej, a różni się od wzoru dla prądu jednofazowego (106) tylko liczbą przewodów: „3”, zamiast „2”. Z kilku alternatyw wybieramy tę, dla której koszt F_2' wypadły najmniejsze. W zasadzie mamy już ustalony przekrój s_2 i liczbę transformatorów N_2 . Rozstawiając transformatory, sprawdzamy, czy spadki napięcia w punktach spływu nie przekraczają dopuszczalnej granicy, albo odwrotnie, czy nie są zbyt małe. W pierwszym przypadku zbliżamy transformatory ku sobie, w drugim — rozsuwamy. Wzory (131) i (132) nie uwzględniają indywidualności poszczególnych sieci, a więc w rzeczywistości może się okazać potrzeba zwiększenia, czy zmniejszenia liczby transformatorów.

Po rozstawieniu transformatorów obliczamy dokładnie rozplyw prądów (wzór 118, 119), sprawdzamy jeszcze raz spadki napięcia i ustalamy obciążenie transformatorów. Przechodzimy do sieci pierwotnej.

Obciążenie tej sieci składa się z instalacji, przyłączonych do niej bezpośrednio, i z transformatorów. Moc, czerpaną przez instalacje, obliczymy tak, jak w sieci wtórnej, mnożąc moc zainstalowaną przez stopień jednoczesności, a moc, czerpaną przez transformatory, znajdziemy, dodając do obciążenia transformatorów kilka procent na straty.

Mając już ustalone odbiory, przystępujemy do obliczania sieci pierwotnej. Zależność przekroju przewodów tej sieci od liczby punktów zasilających wyraża się wzorami (134) i (135), które w zasadzie są identyczne ze wzorami (131) i (132), a różnią się tylko wskaźnikami:

$$s_1 = 0,75 \frac{P_1 S_1}{k_1 6 e_1 \Delta e_1 (\Sigma l_1)} \sqrt[4]{\frac{n_1}{N_1^5}} = 0,75 \frac{P_1 S_1}{k_1 2 E_1 \Delta E_1 (\Sigma l_1)} \sqrt[4]{\frac{n_1}{N_1^5}} \quad (134)$$

$$N_1 = \sqrt[5]{\left(\frac{0,75 P_1 S_1}{k_1 s_1 6 e_1 \Delta e_1 (\Sigma l_1)} \right)^4 n_1} = \sqrt[5]{\left(\frac{0,75 P_1 S_1}{k_1 s_1 2 E_1 \Delta E_1 (\Sigma l_1)} \right)^4 n_1} \quad (135)$$

Gospodarczo najkorzystniejszą liczbę punktów zasilających ustalamy, obliczając dla rozmaitych przekrojów s_1 sumę trzech pozycji kosztorysowych wg wzoru (136), różniącego się od wzoru (109) dla prądu jednofazowego tylko liczbą przewodów: „3”, zamiast „2”:

$$\left[F_1' = c_0 (3 N_1 l_0) + N_1 C_0 + a_1 [3 (\Sigma l_1) s_1] \right] \cdot \quad (136)$$

przybory torów zasil. miedź sieci pierwotnej
punkty zasil. i przył. torów zasil.

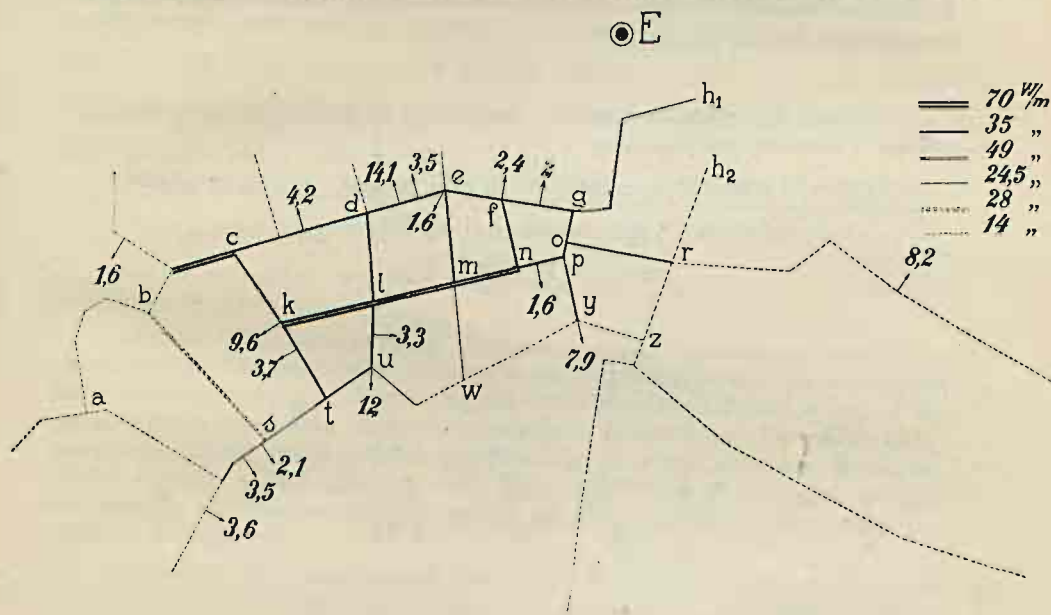
Mając już ustaloną liczbę punktów zasilających, wyznaczamy dla nich odpowiednie miejsca, obliczamy rozptyw prądów, sprawdzamy spadki napięcia i obliczamy obciążenie torów zasilających.

Wreszcie obliczamy przekroje przewodów zasilających na gospodarność wg wzoru (125).

Przykład 68. Rys. 147 przedstawia plan ważniejszych ulic miasta prowincjonalnego. Ulice, oznaczone liniami podwójnymi, są zabudowane obustronnie, a oznaczone liniami pojedynczymi — jednostronnie. Literą E oznaczono położenie elektrowni.

Obciążenie sieci wtórnej. Do sieci wtórnej mają być przyłączone instalacje, w których największe obciążenie nie przekracza 15 kW. Niektóre z tych instalacji można było przewidzieć i ustalić dla nich liczbę kilowatów największego obciążenia (na rys. 147 jest siedemnaście takich instalacji z podaną liczbą kilowatów). Następnie należy się liczyć z obciążeniem drobnym, rozłożonym mniej lub więcej równomiernie. Przypuszczamy, że największe obciążenie równomierne na ulicy głównej, zabudowanej obustronnie, wyniesie 70 W na metr bieżący (czyli 200 W za-

instalowanych przy stopniu jednoczesności 0,35), na ulicy podrzędnej... 49 W, a na krańcach miasta ... 28 W. Dla ulic, zabudowanych jednostronnie, zmniejszamy te liczby do połowy. Na rys. 147 każda kategoria ulic jest oznaczona odrębnymi liniami. Poza obciążeniem skupionem i równomiernie rozłożonym, liczymy jeszcze



Rys. 147.

na oświetlenie ulic 30 kW i otrzymujemy w sumie:

obciążenie skupione (suma liczb, podanych na rys. 147)	84,9	kW
„ rozłożone (średniówki, pomnożone przez długość ulic)	273,4	„
oświetlenie uliczne	30	„
razem . . .	388,3	kW.

Przekrój przewodów sieci wtórnej. Obliczymy gospodarczo najkorzystniejszą liczbę punktów transformatorowych i ustalimy przekrój przewodów nie dla całej sieci wtórnej, lecz tylko dla tej części, która jest siecią zamkniętą. Na rys. 148 otoczyliśmy sieć zamkniętą linią punktowaną w postaci trapezu o obszarze 581100 m^2 . Trzy długie gałęzie otwarte: rr_1 , vv_1 , vv_2 (rys. 148), znacznie wybiegające poza obręb sieci zamkniętej, ocinamy od sieci. Obciążenie tych gałęzi wynosi w sumie $42,9 \text{ kW}$, a więc na sama sieć zamknięta pozostanie:

$$388,3 - 42,9 = 345,4 \text{ kW}.$$

Natomiast obciążenia krótkich gałęzi otwartych uważamy za odbiory, skupione w punktach wyjścia tych gałęzi z sieci zamkniętej. Jak widać z rys. 147, sieć zamknięta składa się z 29 boków (*sab, bc, cd, de, ef, fg, gh, h₂r, ck, dl, em, fn, go, kl, lm, mn, np, po, or, bs, kt, lu, mw, py, rz, st, tu, uw, xy, yz*) o sumarycznej długości 6670 m.

Co się tyczy woltażu, to dla punktów zasilających ustalamy napięcie międzyprzewodowe 220 V. Dopuszczamy największy spadek napięcia 5%, czyli 11 V i przypuszczamy, że średni spadek napięcia w sieci wtórnej wyniesie mniej więcej $\frac{2}{3}$ spadku największego (patrz § 6) czyli 7 V. A zatem średnie napięcie oświetleniowe w sieci wtórnej wypadnie:

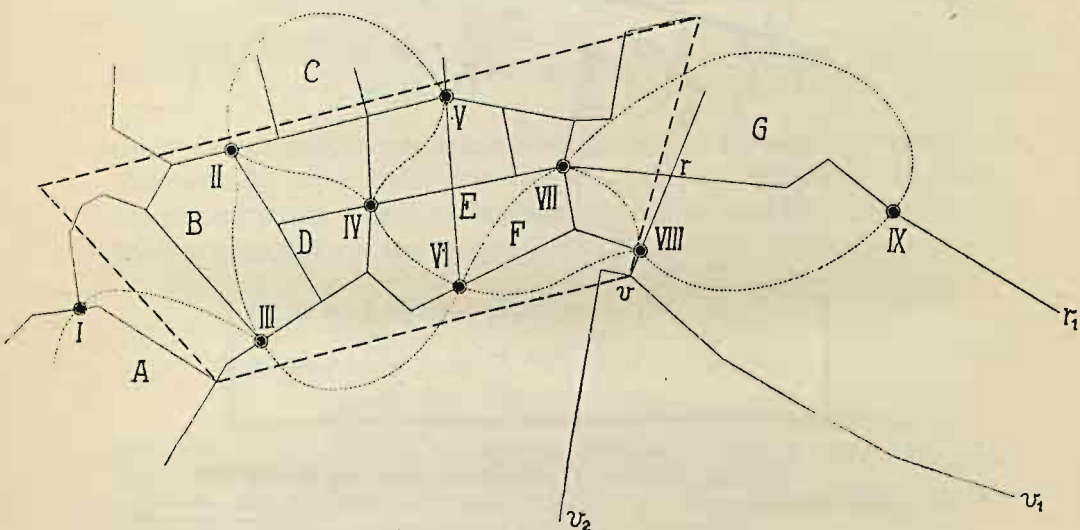
$$220 - 7 = 213 \text{ V.}$$

Obliczmy liczbę transformatorów z założeniem, że sieć wtórna będzie trójprzewodowa o jednostajnym przekroju:

$$1) s_2 = 10 \text{ mm}^2, \quad 2) s_2 = 16 \text{ mm}^2, \quad 3) s_2 = 25 \text{ mm}^2, \quad 4) s_2 = 35 \text{ mm}^2;$$

$$P_2 = 345\,400 \text{ W}, \quad S_2 = 581\,100 \text{ m}^2, \quad n_2 = 29, \quad \Sigma l_2 = 6\,670 \text{ m},$$

$$E_2 = 213 \text{ V}, \quad \Delta E_2 = 11 \text{ V}.$$



Rys. 148.

1) Dla $s_2 = 10 \text{ mm}^2$:

$$N_2 = \sqrt[5]{\left(\frac{0,75 \cdot 345\,400 \cdot 581\,100}{57 \cdot 10 \cdot 2 \cdot 213 \cdot 11 \cdot 6\,670}\right)^4} \cdot 29 = 10,8 \approx 11,$$

2) dla $s_2 = 16 \text{ mm}^2$ $N_2 = 7,4 \approx 7$, 3) $s_2 = 25 \text{ mm}^2$ $N_2 = 5,2 \approx 5$,

4) $s_2 = 35 \text{ mm}^2$ $N_2 = 4$.

Porównujemy cztery powyższe alternatywy z punktu widzenia gospodarczego. Część kosztów stacji transformatorowej, niezależna od mocy transformatora, wynosi w naszym przykładzie 2 400 Złp., a cena miedzi ... 3 Złp. za kg.

$$f = 2\,400 \text{ Złp.} \quad a_2 = 0,001 \cdot 8,9 \cdot 3 = 0,027 \text{ Złp.}$$

Punkt węzłowy	Bok lub odbiór	Prze- krój s mm^2	Długość l m	Nap. śr. \times przewodność		Suma momen- tów $\Sigma p l$ W, m	Moc składowa lub moc odbioru p' W	Suma mo- cy składo- wych i mocy odbioru $\Sigma p' + \text{odb.}$ W	Różnica napięć na krańcach ΔE V	Moc wyrów- nawcza $P' = \Delta E (E_{sr} g)$ W	Moc rzeczy- wista P W
				$E_{sr} g = \frac{E_{sr} k s}{l}$	$\Sigma E_{sr} g$						
				V, Ω^{-1}	V, Ω^{-1}						
1	1 II	16	150	1 295	3531	873 500	— 3700	22 110	8,63	+ 11 170	+ 7470
	1 IV	16	190	1 022			— 3350		8,63	+ 8820	+ 5470
	12	16	160	1 214			— 5460		1,74	+ 2110	— 3350
	odbior						— 9600				— 9600
2	2 III	16	120	1 619	4991	614 500	— 2950	— 8390	6,89	+ 11 160	+ 8210
	21	16	160	1 214			— 3840		1,74	— 2110	— 5950
	23	16	90	2158			— 1600		0,29	— 630	— 2230
3	3 IV	16	90	2158	4923	1 152 000	— 3250	— 20 450	7,18	+ 15 490	+ 12 240
	3 VI	16	320	607			— 3600		7,18	+ 4360	+ 760
	32	16	90	2158			— 1 600		0,29	+ 630	— 970
	odbior						— 12 000				— 12 000

Spadki napięcia gwiazdowego, pomnożone przez $\sqrt{3}$, dają spadki napięcia międzyprzewodowego:

$$\Delta e_l \sqrt{3} = \Delta E_l \quad \Delta e_{l_\alpha} \sqrt{3} = \Delta E_{l_\alpha},$$

a iloczyn prądów watowych przez $\sqrt{3}$ i przez napięcie dają liczby watów czyli moce:

$$(i_\alpha')^w \sqrt{3} \cdot E_{sr} = p_\alpha' \quad (i_l)^w \sqrt{3} \cdot E_{sr} = p_l.$$

A więc wzór równań w ostatecznej formie będzie następujący:

$$\underbrace{\sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} \Delta E_l \sum E_{sr} g_{ll_\alpha}}_{\text{moce prądów wyrównawczych}} - \underbrace{\sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} \Delta E_{l_\alpha} E_{sr} g_{ll_\alpha}}_{\text{moce prądów}} - \underbrace{\sum_{\alpha=1}^{\alpha=n} p_\alpha' - p_l}_{\text{moc składowych odbioru}} = 0.$$

Zestawiwszy wszystkie liczby w jednej tabelicy, układamy równania:

$$\Delta E_1 \cdot 3531 - \Delta E_2 \cdot 1214 - 22110 = 0 \quad (1)$$

$$- \Delta E_1 \cdot 1214 + \Delta E_2 \cdot 4991 - \Delta E_3 \cdot 2158 - 8390 = 0 \quad (2)$$

$$- \Delta E_2 \cdot 2158 + \Delta E_3 \cdot 4923 - 20450 = 0. \quad (3)$$

Z równań tych znajdujemy niewiadome:

$$\Delta E_1 = 8,63 \text{ V} \quad \Delta E_2 = 6,89 \text{ V} \quad \Delta E_3 = 7,18 \text{ V},$$

a następnie wypełniamy w tabelicy trzy ostatnie kolumny. Rozpływ prądów jest już ustalony. Z obciążenia okręgu *D* przypada: na transformator II ... 14,87 kW, na transformator III ... 14,11 kW, IV ... 30,91 kW i VI ... 7,16 kW.

Po obliczeniu wszystkich okręgów otrzymujemy podział całego obciążenia sieci wtórnej na transformatory (w poniższej tabelicy — pierwszy szereg liczb). Chcąc obliczyć obciążenie transformatorów po stronie napięcia niskiego, należy te liczby

Nr transformatora	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	Razem
Obciążenie sieci wtórnej, przypadające na transformator . . .	28,7	49,4	47,6	65,5	57,6	24,2	62,5	35,1	22,7	388,3
Największe obciążenie transformatora po stronie napięcia niskiego	24,5	51	49,2	68	59,6	25	64,8	36,4	23,5	402
Największe obciążenie transformatora po stronie napięcia wysokiego	25,3	52,5	50,8	69,9	61,3	25,8	66,7	37,5	24,2	414
Moc transformatora	40	60	60	80	80	40	80	40	40	520

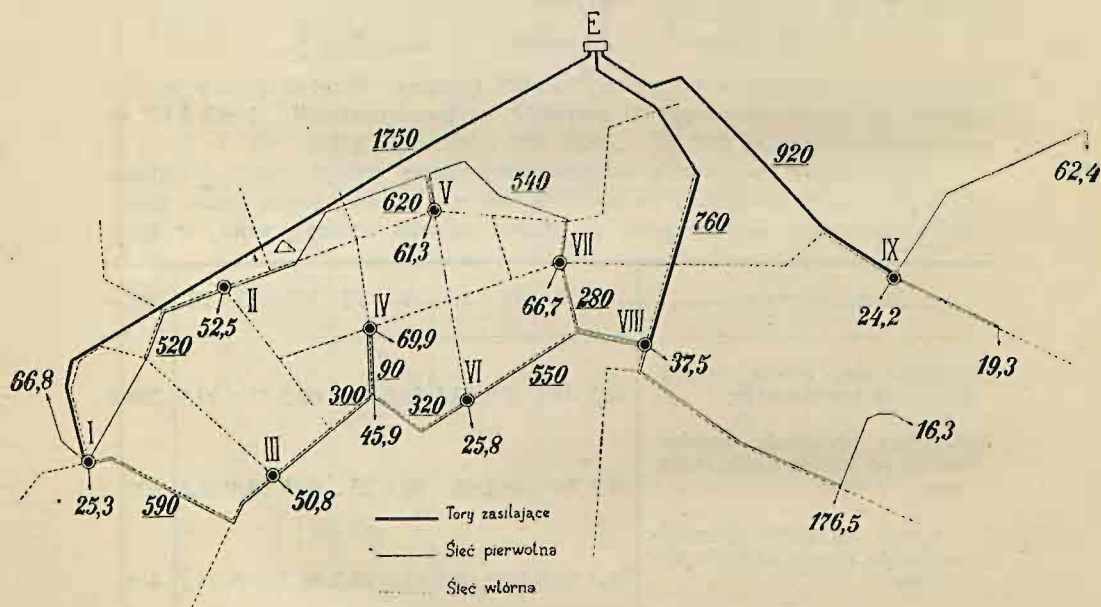
pomnożyć przez stosunek napięcia w transformatorach do średniego napięcia u odbiorców, czyli przez stosunek:

$$\frac{220}{213}.$$

W ten sposób otrzymujemy w tablicy drugi szereg liczb. Dla znalezienia mocy, którą transformatory czerpią z sieci wysokiego napięcia, wypadnie podzielić te liczby przez przypuszczalną sprawność transformatorów, np. przez 0,97. Otrzymujemy trzeci szereg liczb. Wreszcie w ostatnim szeregu podana jest pożądana moc transformatorów wg norm fabrycznych. Moc transformatora powinna przewyższać największe obciążenie o kilkanaście do dwudziestu procent.

Ustrój sieci pierwotnej. Jak widać z rys. 150, sieć pierwotna ma zasilac sześć większych instalacji i dziesięć transformatorów miejskich. Dla taniości sieć pierwotna ma być wykonana w postaci przewodów napowietrznych. Dla przewodów sieci pierwotnej ze względu na grożące niebezpieczeństwo życia upatrujemy ulice podrzędne, mniej zamieszkane. Transformatory I, II, V, VII, VIII, VI, IV i III wtrącamy w jeden tor okrężny. Z tego toru w dwóch miejscach wyprowadzamy gałęzie otwarte do zasilania pobliskich instalacji. Zupełnie na uboczu pozostał się transformator IX i dwie większe instalacje. Wiążemy je między sobą torami otwartymi, ale nie łączymy z głównym torem okrężnym.

Przekrój przewodów sieci pierwotnej. Sieć jest tak prosta (o jednym oku!), że nie może być mowy o stosowaniu wzoru (135), wyprowadzonego dla sieci złożonej.



Rys. 150.

Wybieramy napięcie robocze międzyprzewodowe 3000 V i dopuszczamy 1,5% spadku, czyli 45 V. Najmniejszy dopuszczalny przekrój przewodów napowietrznych przy wysokim napięciu wynosi 10 mm². Chcąc otrzymać ten przekrój w naszym torze okrężnym, wypada dać 2 punkty zasilające. Wybieramy na punkty zasilające trans-

formatory I i VIII. Pozatem potrzebny jest jeszcze jeden punkt zasilający dla doprowadzenia prądu do transformatora IX i dwóch pobliskich instalacyj. Punkt ten umieścimy przy transformatorze IX. Przy takiej dyspozycji cała sieć pierwotna może być wykonana z przewodnika o przekroju 10 mm^2 .

Rozpływ prądów w sieci pierwotnej. Przypuszczamy jednostajny kąt przesuwu i jednostajne napięcie robocze. Obliczamy moce zasilania w torze zamkniętym I-II-V-VII-VIII:

$$p_I = \frac{66,7 \cdot 280 + 61,3 \cdot 820 + 52,5 \cdot 1440}{1960} = 73,6 \text{ kW},$$

$$p_{VIII} = 180,5 - 73,6 = 106,9 \text{ kW}$$

w torze I-III-IV-VI-VIII:

$$p_I = \frac{25,8 \cdot 550 + 45,9 \cdot 870 + 69,9 \cdot 960 + 50,8 \cdot 1260}{1850} = 100,1 \text{ kW},$$

$$p_{VIII} = 192,4 - 100,1 = 92,3 \text{ kW}.$$

Całe obciążenie sieci pierwotnej dzieli się na trzy punkty zasilające w sposób następujący:

$$I \dots 265,8 \text{ kW} \quad VIII \dots 429,5 \text{ kW} \quad IX \dots 105,9 \text{ kW}.$$

Aby uwzględnić straty mocy w torach sieci pierwotnej, należy powyższe liczby powiększyć w stosunku napięcia zasilania do średniego napięcia, panującego przy transformatorach, przypuścmy w stosunku:

$$\frac{3045}{3030}$$

A zatem obciążenie punktów zasilających wyniesie:

$$I \dots 267 \text{ kW} \quad VIII \dots 432 \text{ kW} \quad IX \dots 107 \text{ kW}.$$

Wypadkowy kąt przesuwu. Przypuszczamy, iż w momencie największego obciążenia będzie przypadało na światło (obciążenie opornościowe czyli bezindukcyjne) 40% tego obciążenia, a 60% — na silniki ze średnim współczynnikiem mocy 0,85. Stąd znajdziemy wypadkowy kąt przesuwu po stronie napięcia niskiego:

$$\arccos 0,85 = 31^\circ 50' \quad \varphi_2 = \arctg \frac{40 \operatorname{tg} 0^\circ - 60 \operatorname{tg} 31^\circ 50'}{100} = -20^\circ 30'$$

$$\cos (-20^\circ 30') = 0,94.$$

Współczynnik mocy po stronie wysokiego napięcia będzie o kilka procent mniejszy, przypuścmy:

$$\cos \varphi_1 = 0,89.$$

Przekrój przewodów zasilających obliczamy na gospodarność. Rachunek opieramy na następujących współczynnikach gospodarczych:

$$b = 1 \text{ Złp.} \quad \beta = 0,00004 \text{ Złp.} \quad p_p = 16\% \quad p_e = 13\% \quad a = 0,027 \text{ Złp.} \quad T = 1670 \text{ godz.}$$

$$n_p = \sqrt[3]{0,16 \cdot 0,027 \cdot 57} = 0,496 \quad n_e = \sqrt[3]{0,13 \cdot 1 + 0,00004 \cdot 1670} = 0,444.$$

Obliczamy prądy zasilania z założeniem napięcia 3045 V i współczynnika mocy 0,89:

$$I_I = 57 \text{ A} \quad I_{VIII} = 92 \text{ A} \quad I_{IX} = 23 \text{ A}.$$

Gospodarczo najkorzystniejszy spadek napięcia wyniesie:

$$\Delta E_k = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,496 \cdot 0,89}{57 \cdot 0,444} \cdot \sqrt{\frac{57 \cdot 1750^2 + 92 \cdot 760^2 + 23 \cdot 920^2}{57 + 92 + 23}} = 36 \text{ V}.$$

Obliczamy przekroje przewodów zasilających:

$$s_I = \frac{\sqrt{3} \cdot 57 \cdot 0,89 \cdot 1750}{57 \cdot 36} = 75 \approx 70 \text{ mm}^2 \quad s_{VIII} = 52 \approx 50 \text{ mm}^2$$

$$s_{IX} = 15,8 \approx 16 \text{ mm}^2.$$

A zatem największe napięcie w elektrowni wyniesie:

$$3000 + 45 + 36 = 3081 \text{ V}.$$

Zestawienie wyników. Przekroje przewodów:

tory zasilające	70, 50 i 16 mm ²
sieć pierwotna	10 mm ²
sieć wtórna	16 mm ² .

Napięcie:	przy obciążeniu całkowitem	bez obciążenia
w elektrowni	3081 V	3000 V
w punktach zasilających	3045 V	3000 V
w transformatorach po stronie pierwotnej	od 3000 V do 3045 V	3000 V
" " wtórnej	" 220 V " 223,3 V	220 V
w sieci wtórnej	" 209 V " 223,3 V	220 V.

§ 50. Porównanie układów przewodowych.

Projektując instalacje elektryczne, mamy do wyboru układy: dwuprzewodowe i trójprzewodowe prądu stałego, układ prądu jednofazowego, układy: nieskojarzony i skojarzony prądu dwufazowego, wreszcie układy: trójkątowy i gwiazdowy prądu trójfazowego. Wybór rodzaju prądu i układu połączeń zależy od wielu czynników: od rodzaju odbiorników prądu, od obszaru instalacji, od wykresu obciążenia, od warunków gospodarczych i innych. Na tem miejscu porównamy układy przewodowe tylko z punktu widzenia kosztów zakładowych.

Koszta zakładowe zależą od objętości materiału przewodowego i od liczby przewodów. Aby porównać objętości we wszystkich układach połączeń, wybierzemy tor, obciążony tylko na krańcu, o mocy pobieranej P watów przy współczynniku mocy $\cos \varphi = 1$. Porównanie możemy wykonać dwojako: biorąc za podstawę bądź równość napięć oświetlenio-

wych, bądź równość napięć silnikowych czyli największych napięć panujących między dwoma dowolnymi przewodami. Pozatem przekroje przewodów mogą być obliczane bądź na pewien dopuszczalny spadek napięcia, bądź też na stratę mocy.

W instalacjach *oświetleniowych* decyduje napięcie oświetleniowe, przy którym palą się lampy, a przekroje przewodów oblicza się zawsze na dopuszczalny spadek napięcia. Porównajmy objętości materiału przewodowego V dla różnych układów połączeń przy jednakowym napięciu oświetleniowym ϵ_1 i jednakowym dopuszczalnym spadku napięcia $\Delta\epsilon_1$.

1. Układ dwuprzewodowy prądu stałego. Prąd przewodowy wyniesie $\frac{P}{\epsilon_1}$, a objętość:

$$V = 2sl = 2 \left[\frac{2 \frac{P}{\epsilon_1} l}{k \Delta\epsilon_1} \right] l = 4 \frac{P l^2}{k \epsilon_1 \Delta\epsilon_1}.$$

2. Układ trójprzewodowy prądu stałego. Prąd przewodowy wyniesie $\frac{P}{2\epsilon_1}$, dopuszczalny spadek napięcia w obu połowach sieci razem $\frac{3}{4}(2\Delta\epsilon_1)$;

$$V = 2,5sl = 2,5 \left[\frac{2 \frac{P}{2\epsilon_1} l}{k \frac{3}{4}(2\Delta\epsilon_1)} \right] l = 1,67 \frac{P l^2}{k \epsilon_1 \Delta\epsilon_1}.$$

3. Układ jednofazowy — jak dwuprzewodowy prądu stałego.

4. Układ nieskojarzony prądu dwufazowego. Prąd przewodowy ...

$$\frac{P}{2\epsilon_1};$$

$$V = 4sl = 4 \left[\frac{2 \frac{P}{2\epsilon_1} l}{k \Delta\epsilon_1} \right] l = 4 \frac{P l^2}{k \epsilon_1 \Delta\epsilon_1}.$$

5. Układ skojarzony prądu dwufazowego. Prąd przewodowy — jak wyżej;

$$V = (2 + \sqrt{2})sl = 3,41 \left[\frac{\frac{P}{2\epsilon_1} (1 + \cos 45^\circ) l}{k \Delta\epsilon_1} \right] l = 2,91 \frac{P l^2}{k \epsilon_1 \Delta\epsilon_1}.$$

6. Układ trójkątowy prądu trójfazowego. Napięcie międzyprzewodowe ϵ_1 , prąd przewodowy $\frac{P}{\sqrt{3} \epsilon_1}$, spadek napięcia międzyprzewodowego $\Delta \epsilon_1$, spadek napięcia gwiazdowego, $\frac{\Delta \epsilon_1}{\sqrt{3}}$

$$V = 3 s l = 3 \left[\frac{\left(\frac{P}{\sqrt{3} \epsilon_1} \right)^2 l}{k \left(\frac{\Delta \epsilon_1}{\sqrt{3}} \right)} \right] l = 3 \frac{P l^2}{k \epsilon_1 \Delta \epsilon_1}.$$

7. Układ gwiazdowy prądu trójfazowego. Napięcie gwiazdowe ϵ_1 , prąd przewodowy $\frac{P}{3 \epsilon_1}$, spadek napięcia przy równym obciążeniu faz $\frac{2}{3} \Delta \epsilon_1$;

$$V = 3,5 s l = 3,5 \left[\frac{\left(\frac{P}{3 \epsilon_1} \right)^2 l}{k \frac{2}{3} \Delta \epsilon_1} \right] l = 1,55 \frac{P l^2}{k \epsilon_1 \Delta \epsilon_1}.$$

W instalacjach *silnikowych* główną rolę odgrywa najwyższe napięcie międzyprzewodowe. Izolacja maszyn musi być dostosowana do napięcia najwyższego, a bezpieczeństwo obsługi również zależy od tego napięcia. Co się tyczy obliczania przewodów, to w przesyłaniu energii na odległość kierujemy się raczej względami ekonomicznymi — stratą mocy, niż spadkiem napięcia. Porównajmy więc powtórnie objętości materiału przewodowego dla różnych układów połączeń, biorąc tym razem za podstawę równość napięć silnikowych czyli najwyższych napięć międzyprzewodowych ϵ_2 i równość dopuszczalnej straty mocy ΔP .

1. Układ dwuprzewodowy prądu stałego. Prąd przewodowy wyniesie $\frac{P}{\epsilon_2}$, a objętość :

$$V = 2 s l = 2 \left[\frac{2 \left(\frac{P}{\epsilon_2} \right)^2 l}{k \Delta P} \right] l = 4 \frac{P^2 l^2}{k \epsilon_2^2 \Delta P}.$$

2. Układ trójprzewodowy prądu stałego. Napięcie oświetleniowe $\frac{\epsilon_2}{2}$, prąd przewodowy $\frac{P}{\epsilon_2}$;

$$V = 2,5 s l = 2,5 \left[\frac{2 \left(\frac{P}{\epsilon_2} \right)^2 l}{k \Delta P} \right] l = 5 \frac{P^2 l^2}{k \epsilon_2^2 \Delta P}.$$

3. Układ jednofazowy — jak dwuprzewodowy prądu stałego.

4. Układ nieskojarzony prądu dwufazowego. Napięcie oświetleniowe... $\frac{\varepsilon_2}{\sqrt{2}}$, prąd przewodowy... $\frac{P}{\sqrt{2} \cdot \varepsilon_2}$;

$$V = 4 \, s l = 4 \left[\frac{2 \left(\frac{P}{\sqrt{2} \cdot \varepsilon_2} \right)^2 l}{k \frac{1}{2} \Delta P} \right] l = 8 \frac{P^2 l^2}{k \varepsilon_2^2 \Delta P}.$$

5. Układ skojarzony prądu dwufazowego. Napięcie oświetleniowe i prąd przewodowy — jak wyżej;

$$V = (2 + \sqrt{2}) \, s l = 3,41 \left[\frac{\left(\frac{P}{\sqrt{2} \cdot \varepsilon_2} \right)^2 l}{(2 + \sqrt{2}) \frac{1}{k} \Delta P} \right] l = 5,83 \frac{P^2 l^2}{k \varepsilon_2^2 \Delta P}.$$

6. Układ trójkątowy prądu trójfazowego. Napięcie oświetleniowe... ε_2 , prąd przewodowy... $\frac{P}{\sqrt{3} \cdot \varepsilon_2}$.

$$V = 3 \, s l = 3 \left[3 \frac{\left(\frac{P}{\sqrt{3} \cdot \varepsilon_2} \right)^2 l}{k \Delta P} \right] l = 3 \frac{P^2 l^2}{k \varepsilon_2^2 \Delta P}.$$

7. Układ gwiazdowy prądu trójfazowego. Napięcie oświetleniowe... $\frac{\varepsilon_2}{\sqrt{3}}$, prąd przewodowy... $\frac{P}{\sqrt{3} \cdot \varepsilon_2}$;

$$V = 3,5 \, s l = 3,5 \left[3 \frac{\left(\frac{P}{\sqrt{3} \cdot \varepsilon_2} \right)^2 l}{k \Delta P} \right] l = 3,5 \frac{P^2 l^2}{k \varepsilon_2^2 \Delta P}.$$

Z zestawienia tego wynika, że przy równych napięciach oświetleniowych najmniej materiału przewodowego zużywa układ gwiazdowy prądu trójfazowego i układ trójprzewodowy prądu stałego, a przy równych napięciach silnikowych — układ trójkątowy. Dla instalacji oświetleniowych można byłoby polecać układ gwiazdowy i trójprzewodowy, gdyby nie ta okoliczność, że właśnie oba te układy są mało elastyczne, a przy nierównym podziale obciążeń dają wzrosty napięcia. Układ trójkątowy wykazuje w porównaniu z układem dwuprzewodowym 25% oszczędności na miedzi bez względu na to, czy założymy jednakowe napięcia oświetleniowe, czy też — jednakowe napięcia silnikowe.

Tablica XI. *Porównanie objętości materiału przewodowego.*

Rodzaj prądu i układ połączeń	Stosunek na- pięcia silni- kowego do oświetlenio- wego	Objętość materiału przewod. w %		Liczba przewodów
		przy równych na- pięciach oświe- tleniowych i rów- nych spadkach napięcia	przy równych napięciach silni- kowych i rów- nych stratach mocy	
Prąd stały dwuprzewodowy	1:1	100%	100%	2
„ „ trójprzewodowy.	2:1	42	125	3
„ jednofazowy . . .	1:1	100	100	2
Prąd dwufazowy nieskoja- rzony	$\sqrt{2}:1$	100	200	4
Prąd dwufazowy skoja- rzony	$\sqrt{2}:1$	73	146	3
Prąd trójfazowy trójkątowy	1:1	75	75	3
„ „ gwiazdowy	$\sqrt{3}:1$	39	87	4