

ROZDZIAŁ XII.

Linja dalekonośna trójfazowa.

§ 55. Indukcyjność.

W trójfazowych liniach dalekonośnych będziemy rozpatrywali każdy przewód z osobna tak, jak gdyby przewodził on prąd jednofazowy o napięciu e względem punktu obojętnego (ziemi). W układzie jednofazowym napięcie e równa się połowie napięcia roboczego E , w układzie trójfazowym — równa się napięciu gwiazdowemu, a więc jest $\sqrt{3}$ razy mniejsze od napięcia międzyprzewodowego E . Weźmy najprostszy przykład napowietrznego toru trójfazowego, w którym wszystkie trzy przewody A, B, C (rys. 171) zawieszono są w równych od siebie odstępach. Na krańcu toru z panują jednakowe napięcia gwiazdowe:

$$e_s^A = e_s^B = e_s^C,$$

przesunięte w fazie względem siebie o 60° . Obciążenie jest indukcyjne, rozłożone równomiernie na wszystkie trzy fazy, a więc prądy przewodowe są jednakowe:

$$I^A = I^B = I^C$$

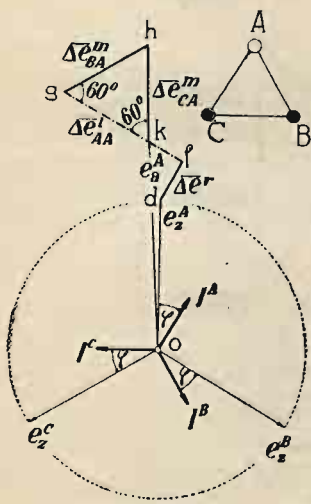
i opóźnione w fazie względem napięcia o jednakowe kąty φ .

Dla przewodu A obliczamy oporność r , indukcyjność własną l_{AA} (wg wzoru 141), indukcyjność wzajemną m_{BA} przewodu B na A (wg wzoru 142) i indukcyjność wzajemną m_{CA} przewodu C na A (wg

tego samego wzoru 142). Wobec jednakowych odległości między przewodami, oba ostatnie współczynniki są sobie równe:

$$m_{BA} = m_{CA}.$$

Aby znaleźć napięcie, panujące u źródła prądu, dodajemy geometrycznie do napięcia na krańcu e_s^A (na rys. 171 — wektor \overrightarrow{od}):



Rys. 171.

- 1) stratę omową: $\overline{\Delta e^r} = I^A \cdot r$ (wektor \overline{df}) w kierunku prądu I^A ,
- 2) stratę indukcyjną własną: $\overline{\Delta e_{AA}^l} = I \cdot 2 \pi f l_{AA}$ (wektor \overline{fg}) w kierunku, wyprzedzającym prąd I^A o 90° ,
- 3) stratę indukcyjną wzajemną od przewodu B... $\overline{\Delta e_{BA}^m} = I \cdot 2 \pi f m_{BA}$ (wektor \overline{gh}) w kierunku, wyprzedzającym prąd I^B o 90° , i wreszcie
- 4) stratę indukcyjną wzajemną od przewodu C... $\overline{\Delta e_{CA}^m} = I \cdot 2 \pi f m_{CA}$ (wektor \overline{hk}) w kierunku, wyprzedzającym prąd I^C o 90° :

$$\hat{e}_s^A + \hat{\Delta e^r} + \hat{\Delta e_{AA}^l} + \hat{\Delta e_{BA}^m} + \hat{\Delta e_{CA}^m} = \hat{e}_a^A.$$

W sumie otrzymujemy napięcie u źródła... e_a^A (wektor \overline{ok}).

Rozpatrzmy straty indukcyjne. Indukcje wzajemne zmniejszają wpływ indukcji własnej. Indukcyjna strata wypadkowa $\overline{\Delta e_A^l}$ (wektor \overline{fk}) leży w fazie straty samoindukcyjnej i wynosi:

$$\begin{aligned} \overline{\Delta e_A^l} &= \overline{\Delta e_{AA}^l} - \overline{\Delta e_{BA}^m} \cos 60^\circ - \overline{\Delta e_{CA}^m} \cos 60^\circ = I^A \cdot 2 \pi f (l_{AA} - \frac{1}{2} m_{BA} - \frac{1}{2} m_{CA}) = \\ &= I^A \cdot 2 \pi f l_A. \end{aligned}$$

Spółczynnik indukcji wypadkowej czyli indukcyjność wyraża się w tym przykładzie wzorem:

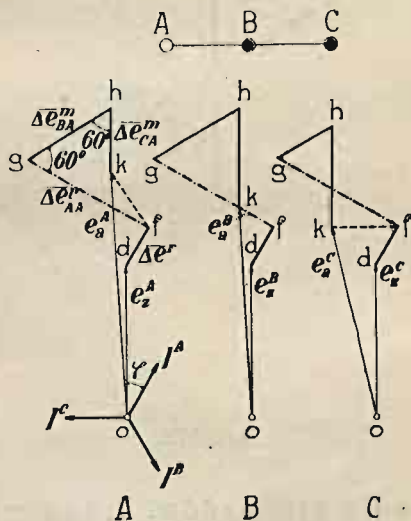
$$l_A = l_{AA} - \frac{1}{2} m_{BA} - \frac{1}{2} m_{CA}. \quad (a)$$

Weźmy inny przykład, różniący się od poprzedniego tylko tem, że przewody A, B, C (rys. 172) będą ułożone nie w trójkąt, lecz w linii prostej. Odstępy \overline{AB} i \overline{BC} pozostawimy jednakowej długości, przez co odstęp \overline{AC} stanie się dwa razy większy. Zbudujemy wykres dla przewodu A (rys. 172 - A). Spółczynniki indukcji wzajemnej m_{BA} i m_{CA} , wskutek nierówności odstępów \overline{BA} i \overline{CA} , nie będą już jednakowe:

$$m_{CA} < m_{BA}$$

i różnej wartości będą straty napięcia od indukcji wzajemnej:

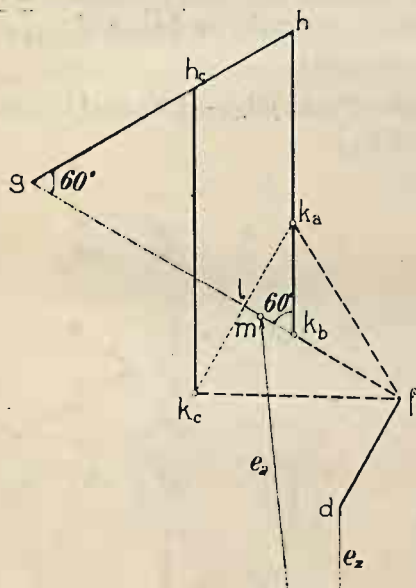
$$\overline{\Delta e_{CA}^m} < \overline{\Delta e_{BA}^m}.$$



Rys. 172.

Wskutek tej nierówności wzrośnie w fazie A indukcyjna strata napięcia wypadkowa $\overline{\Delta e_A^I}$ (na rys. 172-A ... wektor \overline{fk}) i wyjdzie poza fazę straty samoindukcyjnej (\overline{fg}).

Inaczej będzie z przewodem B . Odstępy \overline{AB} i \overline{CB} są tu sobie równe, a zatem wykres wektorowy (rys. 172-B) będzie taki sam, jak w przykładzie poprzednim (rys. 171). Indukcyjna strata napięcia wypadkowa (\overline{fk}) znajdzie się w jednej fazie ze stratą samoindukcyjną. Wreszcie w przewodzie C wektory ułożą się (rys. 172-C) podobnie, jak w A , tylko strata wypadkowa (\overline{fk}) tym razem będzie z przeciwnej strony straty samoindukcyjnej (\overline{fg}).



Rys. 173.

Budując ten wykres przypuszczaliśmy, że napięcia na krańcu toru: e_a^A , e_a^B , e_a^C są jednakowe i że kąty przesuwu między nimi są także jednakowe. Wskutek różnych strat indukcyjnych otrzymaliśmy napięcia na początku toru: e_a^A , e_a^B , e_a^C różnej wartości i przesunięte o kąty niejednakowe. W rzeczywistości będzie odwrotnie. Równość napięć i kątów będzie panować u źródła prądu, a na krańcu toru wystąpi niesymetria.

Układ przewodów w przykładzie pierwszym (rys. 171) nazywamy symetrycznym, a w przykładzie drugim (rys. 172) — niesymetrycznym. W układzie niesymetrycznym można przywrócić symetrię przez przeple-

cenie przewodów. Podzielmy tor na trzy równe sobie odcinki i poprowadźmy przewody tak, aby każdy z nich w każdym odcinku biegł innym szlakiem: 1) szlakiem A (rys. 172), 2) szlakiem B i 3) szlakiem C . Indukcyjną stratę wypadkową na szlaku A daje wektor \overline{fk} na rys. 172-A, albo — w większej skali wektor $\overline{fk_a}$ na rys. 173. Tę samą stratę na szlaku B daje wektor $\overline{fk_b}$, a na szlaku C — wektor $\overline{fk_c}$. Każdy przewód musi przejść przez wszystkie trzy szlaki, a więc strata induk-

cyjna na całej długości będzie wielkością średnią z trzech składników geometrycznych:

$$\begin{aligned}\hat{\Delta e}' &= \frac{1}{3} \left[\hat{f k_a} + \hat{f k_b} + \hat{f k_c} \right] \\ \overline{\Delta e}' &= \frac{1}{3} \left(2 \overline{f l} + \overline{f k_b} \right) = \overline{f m}. \quad (b)\end{aligned}$$

Stratę tedy wypadkową co do wartości i kierunku przedstawia wektor $\overline{f m}$. Strata ta, pomimo układu niesymetrycznego, wpadła w jedną fazę ze stratą samoindukcyjną. To samo będzie w dwóch przewodach pozostałych. Słowem, straty we wszystkich trzech przewodach będą jednakowe i na obu krańcach toru przeplecionego będzie panować symetria całkowita.

Indukcyjną stratę wypadkową obliczymy ze wzoru (b). Wektor $\overline{f l}$ jest różnicą straty samoindukcyjnej $\overline{f g}$ i odcinka $\overline{g l}$, który jest rzutem strat wzajemnych w przewodzie A (albo C) na wektor $\overline{f g}$:

$$\overline{f l} = \overline{f g} - \overline{g l} = \overline{f g} - \overline{g h} \cos 60^\circ - \overline{h k_a} \cos 60^\circ = \overline{\Delta e'_{AA}} - \frac{1}{2} \overline{\Delta e^m_{BA}} - \frac{1}{2} \overline{\Delta e^m_{CA}}.$$

Wektor zaś $\overline{f k_b}$ jest różnicą straty samoindukcyjnej $\overline{f g}$ i odcinka $\overline{g k_b}$, który jest rzutem strat wzajemnych w przewodzie B na wektor $\overline{f g}$:

$$\overline{f k_b} = \overline{f g} - \overline{g k_b} = \overline{f g} - \overline{g h} \cos 60^\circ - \overline{h k_b} \cos 60^\circ = \overline{\Delta e'_{BB}} - \frac{1}{2} \overline{\Delta e^m_{CB}} - \frac{1}{2} \overline{\Delta e^m_{AB}}.$$

A zatem strata wypadkowa wyraża się wzorem:

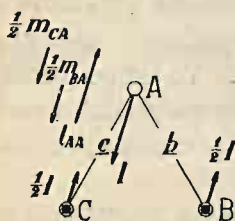
$$\begin{aligned}\overline{\Delta e}' &= \frac{1}{3} \left(2 \overline{f l} + \overline{f k_b} \right) = \\ &= \frac{1}{3} \left\{ 2 \left(\overline{\Delta e'_{AA}} - \frac{1}{2} \overline{\Delta e^m_{BA}} - \frac{1}{2} \overline{\Delta e^m_{CA}} \right) + \left(\overline{\Delta e'_{BB}} - \frac{1}{2} \overline{\Delta e^m_{CB}} - \frac{1}{2} \overline{\Delta e^m_{AB}} \right) \right\} = \\ &= I \cdot 2 \pi f \left\{ \underbrace{\frac{1}{3} \left[2 \left(l_{AA} - \frac{1}{2} m_{BA} - \frac{1}{2} m_{CA} \right) \right]}_{\text{na szlaku A (albo C)}} + \underbrace{\left(l_{BB} - \frac{1}{2} m_{CB} - \frac{1}{2} m_{AB} \right)}_{\text{na szlaku B}} \right\},\end{aligned}$$

a indukcyjność wypadkowa jednego przewodu na całej długości toru:

$$l_{A,B,C} = \frac{1}{3} \left[2 \left(l_{AA} - \frac{1}{2} m_{BA} - \frac{1}{2} m_{CA} \right) + \left(l_{BB} - \frac{1}{2} m_{CB} - \frac{1}{2} m_{AB} \right) \right]. \quad (c)$$

Gdy porównamy tor symetryczny (rys. 171) z niesymetrycznym (rys. 172) lecz przeplecionym, zauważymy, że w jednakowych warunkach straty indukcyjne są większe w drugim przypadku, niż w pierwszym. Wykazuje to dobitnie wykres na rys. 173. Przy symetrii naturalnej stratę indukcyjną przedstawiałby wektor \vec{fk}_b , przy symetrii zaś, osiągniętej przez przeplecenie, — wektor \vec{fm} .

1. *Linia jednotorowa symetryczna* (rys. 174). Indukcyjność



Rys. 174.

jednego przewodu linii symetrycznej wyprowadzi-
liśmy już wyżej metodą ścisłą i otrzymaliśmy
wzór (a). Do tego samego wzoru dojdziemy me-
todą strzałkową, łatwą do zapamiętania, choć nau-
kowo nieścisłą, rozumując w sposób następujący.

W pewnym momencie po przewodzie *A* pły-
nie ku nam prąd o natężeniu największym *I*,
a jednocześnie po przewodach *B* i *C* płyną od
nas prądy o wartości połowicznej $\frac{1}{2} I$. Rozpatru-

jemy przewód *A*. Prąd indukcji własnej l_{AA} będzie skierowany od-
wrotnie, niż prąd w przewodzie *A*, a prądy indukcji wzajemnej:
 $\frac{1}{2} m_{BA}$ i $\frac{1}{2} m_{CA}$ — odwrotnie, niż prądy w przewodach *B* i *C*. A więc
indukcja wypadkowa przewodu *A* wyrazi się sumą algebraiczną:

$$l_A = l_{AA} - \frac{1}{2} m_{BA} - \frac{1}{2} m_{CA}.$$

Podstawiając wartości współczynników wg wzorów (141) i (142),
otrzymamy:

$$l'_A = 2l \left\{ \left(\ln \frac{2l}{r} - 1 + \frac{\mu}{4} \right) - \frac{1}{2} \left(\ln \frac{2l}{b} - 1 \right) - \frac{1}{2} \left(\ln \frac{2l}{c} - 1 \right) \right\},$$

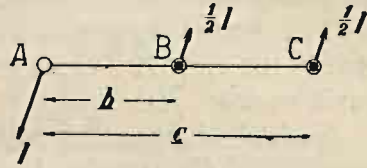
a dla materiału niemagnetycznego, po sprowadzeniu na 1 km, na henry
i logarytmy zwyczajne oraz po uwzględnieniu, że $c = b$...

$$l_A = 4,6 \left(\log \frac{\sqrt{bc}}{0,78 r} \right) 10^{-4} = 4,6 \left(\log \frac{b}{0,78 r} \right) 10^{-4} \dots H/km. \quad (175)$$

Wzór (175) nadaje się również do obliczania indukcyjności trój-
żyłowych kabli skręconych; wielkość *b* będzie oznaczać nadal odle-
głość między osiami żył (rys. 180).

2. *Linja jednotorowa niesymetryczna przepleciona.* Rys. 175 daje przykład jednotorowej linii niesymetrycznej. W celu osiągnięcia symetrii wypadnie linię podzielić na trzy odcinki jednakowej długości i przepleść wg następującego schematu:

$A B C$ | $C A B$ | $B C A$
 (1) (2) (3).



Rys. 175.

Posiłkując się metodą strzałkową, otrzymamy ogólny wzór na indukcyjność wypadkową przewodu A:

$$l_A = l_{AA} - \frac{1}{2} m_{BA} - \frac{1}{2} m_{CA}. \quad (d)$$

W przykładzie niniejszym przewód środkowy biegnie w równych odstępach od przewodów skrajnych. W odcinku 1-ym (rys. 175)...

$$\overline{AB} = \overline{BC} = b \quad \overline{AC} = c = 2b.$$

Indukcyjność wypadkowa przewodu A wg równania (d) wyniesie w odcinku pierwszym:

$$(l_A)_1 = 4,6 \left(\log \frac{\sqrt{b \cdot c}}{0,78 r} \right) 10^{-4} = 4,6 \left(\log \frac{\sqrt{b (2b)}}{0,78 r} \right) 10^{-4},$$

w odcinku drugim —

$$(l_A)_2 = 4,6 \left(\log \frac{\sqrt{b \cdot b}}{0,78 r} \right) 10^{-4},$$

a w odcinku trzecim —

$$(l_A)_3 = 4,6 \left(\log \frac{\sqrt{c \cdot b}}{0,78 r} \right) 10^{-4} = 4,6 \left(\log \frac{\sqrt{(2b) b}}{0,78 r} \right) 10^{-4}.$$

Wreszcie indukcyjność przewodu A na całej długości toru będzie średnią arytmetyczną z tych trzech wartości:

$$\begin{aligned}
 l_A &= \frac{1}{3} \left[(l_A)_1 + (l_A)_2 + (l_A)_3 \right] = \\
 &= 4,6 \cdot \frac{1}{3} \left[\log \frac{\sqrt{2b^2}}{0,78 r} + \log \frac{\sqrt{b^2}}{0,78 r} + \log \frac{\sqrt{2b^2}}{0,78 r} \right] 10^{-4} = \\
 &= 4,6 \left(\log \frac{\sqrt[3]{2 \cdot b}}{0,78 r} \right) 10^{-4} = 4,6 \left(\log 1,26 \cdot \frac{b}{0,78 r} \right) 10^{-4} \dots H/km. \quad (176)
 \end{aligned}$$

W rozumowaniu powyższym popełniliśmy pewną nieścisłość. Wzór (d) przedstawia indukcyjność wypadkową przewodu A tylko wówczas, gdy oba odstępów \overline{BA} i \overline{CA} są zupełnie jednakowe. Gdy odstępów te są różne, następuje pewna komplikacja, wykazana na rys. 173. Wzór (d) daje wówczas nie „indukcyjność wypadkową”, lecz jakby „rzut indukcyjności wypadkowej na wektor straty samoindukcyjnej” (na rys. 173 — zamiast współczynnika straty $f k_a$, daje współczynnik wartości $f l$).

Nieścisłość powyższą popełniliśmy dwukrotnie: przy obliczaniu indukcyjności dla odcinka 1-go i — dla odcinka 3-go. Oba błędy jednak zniósł się wzajemnie tak, że wzór ostateczny (176) jest zupełnie dokładny.

Z porównania wzorów (175) i (176) wynika, że przy jednakowych odstępach b indukcyjność w linii przeplecionej jest nieco większa.

3. *Linia dwutorowa symetryczna* (rys. 176). Przewody ułożono w sześciokąt foremny, przyczem przewody wspólnych torów: 1) A_1, B_1, C_1 i 2) A_2, B_2, C_2 dają w przekroju trójkąty równoboczne. Symetria jest kompletna, zarówno wówczas, gdy pracują oba tory naraz, jak i przy pracy toru pojedynczego.

Gdy oba tory będą obciążone jednakowo, indukcyjność przewodu A_1 wg metody strzałkowej (rys. 176) wyrazi się wzorem:

$$l_{A_1} = l_{A_1 A_1} + m_{A_2 A_1} - \frac{1}{2} m_{B_1 A_1} - \frac{1}{2} m_{B_2 A_1} - \frac{1}{2} m_{C_1 A_1} - \frac{1}{2} m_{C_2 A_1},$$

czyli

$$l_{A_1} = 4,6 \left(\log \frac{\sqrt{b_1 b_2 c_1 c_2}}{0,78 r a_2} \right) 10^{-4}.$$

Indukcyjność przewodu A_2 będzie tej samej wartości, a indukcyjność podwójnego przewodu $A_1 + A_2$ wypadnie dwa razy mniejsza.

Oznaczywszy bok sześciokąta przez b , otrzymamy:

$$a_2 = 2b; \quad b_1 = c_1 = \sqrt{3} \cdot b; \quad b_2 = c_2 = b.$$

Po podstawieniu do wzoru tych wartości, otrzymamy indukcyjność wypadkową jednej fazy A (przewodu podwójnego):

$$l_A = \frac{1}{2} 4,6 \left(\log \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{b}{0,78 r} \right) 10^{-4} = 2,3 \left(\log 0,866 \cdot \frac{b}{0,78 r} \right) 10^{-4} \dots H/km. \quad (177)$$

4. *Linja dwutorowa niesymetryczna przepleciona.* Weźmy dla przykładu linię dwutorową, która w przekroju daje dwa kwadraty, ustawione jeden na drugim (rys. 177). Ze względów praktycznych jeden tor biegnie stale po lewej stronie słupa, a drugi — po prawej. W tym przypadku osiągniemy symetrię, dzieląc linię na trzy odcinki i przeplatając oba tory tak, aby skręcały się w kierunkach odwrotnych. Schemat przeplatania będzie następujący:

A_1	C_2	B_1	A_2	C_1	B_2
B_1	B_2	C_1	C_2	A_1	A_2
C_1	A_2	A_1	B_2	B_1	C_2
(1)		(2)		(3)	

Gdy oba tory będą obciążone jednakowo, indukcyjność przewodu A_1 wg metody strzałkowej (rys. 177) wyrazi się wzorem :

$$l_{A_1} = l_{A_1 A_1} + m_{A_2 A_1} - \frac{1}{2} m_{B_1 A_1} - \frac{1}{2} m_{B_2 A_1} - \frac{1}{2} m_{C_1 A_1} - \frac{1}{2} m_{C_2 A_1}$$

$$(l_{A_1})_1 = 4,6 \left(\log \frac{\sqrt{b_1 b_2 c_1 c_2}}{0,78 r a_2} \right) 10^{-4}$$

Oznaczywszy jednakowe odstępów pionowe i poziome między przewodami przez b , otrzymamy dla odcinka 1-go (rys. 177):

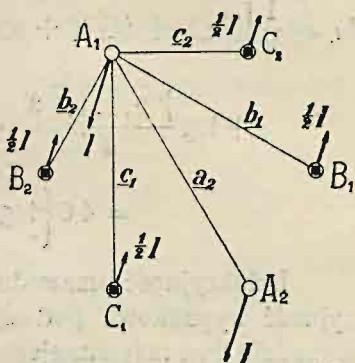
$$a_2 = \sqrt{5} \cdot b \quad b_1 = b \quad b_2 = \sqrt{2} \cdot b$$

$$c_1 = 2b \quad c_2 = b.$$

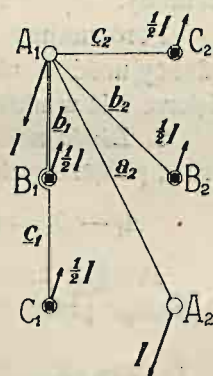
A więc:

$$\begin{aligned} (l_{A_1})_1 &= 4,6 \left\{ \log \frac{\sqrt{b \cdot \sqrt{2} \cdot b \cdot 2b \cdot b}}{0,78 r \sqrt{5} \cdot b} \right\} 10^{-4} = \\ &= 4,6 \left\{ \log \frac{b}{0,78 r} + \log \frac{\sqrt{1 \cdot \sqrt{2} \cdot 2 \cdot 1}}{\sqrt{5}} \right\} 10^{-4}. \end{aligned}$$

W ten sam sposób obliczymy indukcyjności dla wszystkich trzech



Rys. 176.



Rys. 177.

odcinków. Indukcyjność całego przewodu A_1 będzie średnią arytmetyczną z obliczonych wartości:

$$l_{A_1} = \frac{1}{3} [(l_{A_1})_1 + (l_{A_1})_2 + (l_{A_1})_3] = 4,6 \left\{ \log \frac{b}{0,78 r} + \frac{1}{3} \left[\log \frac{\sqrt[3]{1 \cdot \sqrt{2} \cdot 2 \cdot 1}}{\sqrt{5}} + \right. \right. \\ \left. \left. + \log \frac{\sqrt{2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \sqrt{2}}}{\sqrt{5}} + \log \frac{\sqrt[3]{1 \cdot \sqrt{2} \cdot 1 \cdot \sqrt{2}}}{1} \right] \right\} 10^{-4} = \\ = 4,6 \left\{ \log \frac{b}{0,78 r} + \frac{1}{3} \log \frac{4}{5} \right\} 10^{-4}.$$

Indukcyjność przewodu A_2 będzie miała tę samą wartość, a indukcyjność wypadkowa podwójnego przewodu $A_1 + A_2$, czyli — fazy A , wypadnie dwa razy mniejsza:

$$l_A = \frac{1}{2} 4,6 \left(\log \sqrt[3]{\frac{4}{5} \cdot \frac{b}{0,78 r}} \right) 10^{-4} = 2,3 \left(\log 0,928 \cdot \frac{b}{0,78 r} \right) 10^{-4} \dots\dots H/km. \quad (178)$$

I tym razem popełniliśmy tę samą nieścisłość, co w punkcie 2). Błędy jednak zniósły się wzajemnie tak, że wzór (178) jest zupełnie dokładny.

Porównajmy wzory: (177), (178). Przy jednakowych odstępach b indukcyjność w układzie niesymetrycznym przeplecionym jest nieco większa, niż w układzie symetrycznym.

5. *Linja wielotorowa.* Przypuśćmy, że mamy linię, złożoną z n torów, połączonych równolegle (rys. 178):

$$A_1 - B_1 - C_1; \dots\dots A_n - B_n - C_n.$$

Stosując metodę strzałkową, znajdziemy indukcyjność wypadkową dowolnego przewodu A_1

$$\left(l_{A_1 A_1} + m_{A_1 A_1} + \dots + m_{A_n A_1} + \dots + m_{A_n A_1} \right) - \frac{1}{2} \left(m_{B_1 A_1} + \dots + \right. \\ \left. + m_{B_n A_1} + \dots + m_{B_n A_1} \right) - \frac{1}{2} \left(m_{C_1 A_1} + \dots + m_{C_n A_1} + \dots + m_{C_n A_1} \right).$$

Ściśle biorąc, suma powyższa nie jest indukcyjnością wypadkową, lecz, jak już mówiliśmy poprzednio, — „rzutem indukcyjności wypadkowej na wektor straty samoindukcyjnej“. Różnica jednak między temi dwiema wartościami jest tak nieznaczna (porównaj na rys. 173 wektory $\overline{fk_a}$ i \overline{fl}), że możemy nie brać jej w rachubę.

Po wprowadzeniu wartości współczynników otrzymamy wzór:

$$l_{A_1} = 4,6 \left(\log \frac{\delta}{0,78 r_1} \right) 10^{-4} \dots H/km \quad \delta = \frac{\sqrt{b_1 b_2 \dots b_n c_1 c_2 \dots c_n}}{a_2 \dots a_n} \quad (179)$$

Ze wzoru powyższego można wyprowadzić wzory poprzednie: (175), (176), (177) i (178).

Indukcyjność przewodu pojedynczego wyraża się wzorem jednakowym, zarówno dla linii jednofazowej (wzór 146), jak trójfazowej (wzór 179); różnica zachodzi tylko co do wielkości δ .

Wielkość δ jest to stosunek „pierwiastka kwadratowego z iloczynu odległości przewodu A_1 od wszystkich przewodów odmiennego biegunowości” do „iloczynu z odległości przewodu A_1 od wszystkich przewodów tej samej biegunowości”.

Wielkość δ dla linii jednotorowej symetrycznej jest odstępem między przewodami:

$$\delta = b,$$

a wogóle będzie pewnym odstępem umyślonym, wyrażonym w *cm*.

Indukcyjność wypadkową wszystkich n przewodów o biegunowości A obliczymy z równania:

$$\frac{1}{l_A} = \frac{1}{l_{A_1}} + \frac{1}{l_{A_2}} + \dots + \frac{1}{l_{A_n}} + \dots + \frac{1}{l_{A_n}}.$$

Gdyby indukcyjności wszystkich przewodów były jednakowe:

$$l_{A_1} = l_{A_2} = \dots = l_{A_n} = \dots = l_{A_n} = l,$$

wówczas indukcyjność wypadkowa wszystkich n przewodów o biegunowości A byłaby n razy mniejsza od indukcyjności przewodu pojedynczego:

$$\left[l_A = \frac{l}{n} \right].$$

Strata indukcyjna napięcia gwiazdowego w biegunie A oblicza się wg wzoru, podobnego do (139):

$$\left[\Delta e^i = I \cdot 2 \pi f \cdot l_A \right]. \quad (180)$$

§ 56. Pojemność i upływność.

Pojemność. Przewody w układzie niesymetrycznym mają nie tylko indukcyjności niejednakowe, ale i różne pojemności. Niesymetria układu, wskutek niejednakowych strat indukcyjnych, odbija się w dziedzinie napięć, a wskutek niejednakowych prądów ładowania, odbija się w dziedzinie natężeń prądów. Innymi słowy, w poszczególnych fazach układu niesymetrycznego wartości wektorów wypadają różne kąty między wektorami niejednakowe. Tyczy się to zarówno wektorów prądowych, jak napięciowych.

Natomiast w układzie, który jest symetrycznym pod względem indukcyjnym, panuje symetria pojemnościowa. Należyte przeplecenie toru elektrycznego przywraca równość strat indukcyjnych, a jednocześnie przywraca równość prądów ładowania.

Do obliczania pojemności użyjemy metody, zastosowanej poprzednio do linii jednofazowych, metody niezupełnie ścisłej, ale szybko prowadzącej do celu.

1. *Linia jednotorowa symetryczna* (rys. 179). W chwili, gdy przewód A będzie miał ładunek $(+Q)$, przewody B i C będą obarczone ładunkiem każdy po $(-\frac{1}{2}Q)$. Potencjał własny przewodu A wyniesie wg wzoru (151):

$$V_{AA} = +2Q \ln \left(\frac{a'}{r} \right),$$

a potencjały wzajemne wg (152):

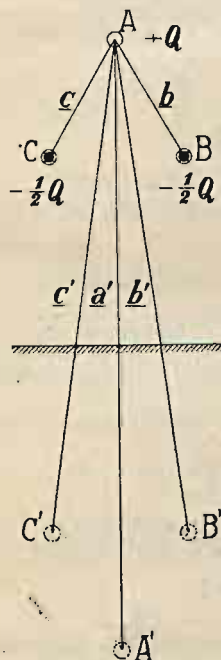
$$V_{BA} = -Q \ln \left(\frac{b'}{b} \right) \quad V_{CA} = -Q \ln \left(\frac{c'}{c} \right).$$

Potencjał wypadkowy przewodu A równa się sumie algebraicznej:

$$V_A = V_{AA} + V_{BA} + V_{CA} = 2Q \ln \left(\frac{a' \sqrt{bc}}{r \sqrt{b'c'}} \right),$$

a pojemność:

$$c'_A = \frac{Q}{V_A} = \frac{1}{2 \ln \left(\frac{a' \sqrt{bc}}{r \sqrt{b'c'}} \right)} \text{ w jednostkach (cgs).}$$



Rys. 179.

Pojemność ta, przeliczona na 1 km i na jednostki praktyczne, wyraża się wzorem:

$$c_A = \frac{0,0242}{\log \left(\frac{a' \sqrt{b c}}{r \sqrt{b' c'}} \right)} \text{ w jednostkach } \mu F/km. \quad (a)$$

Uwzględniając wreszcie, że odstęp b i c są sobie równe, a odległości a' , b' i c' przy wysokim zawieszeniu przewodów są niemal jednakowe, otrzymamy:

$$c_A \approx \frac{0,0242}{\log \left(\frac{b}{r} \right)} \text{ w jednostkach } \mu F/km. \quad (181)$$

Pojemność jednej żyły A w kablu trójżyłowym skręconym (rys. 180) wyrazi się innym wzorem:

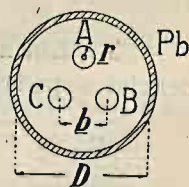
$$c_A = \frac{0,0483 \varepsilon}{\log \left[\frac{b^2}{r^2} \cdot \frac{(3D^2 - 4b^2)^3}{(3D^2)^3 - (4b^2)^3} \right]} \dots \mu F/km, \quad (182)$$

przyczem ε jest stałą dielektryczną materiału izolacyjnego ($= 3,6$ do $4,2$),

D — średnicą wewnętrzną powłoki ołowianej w cm ,

b — odległością między osiami żył w cm ,

r — promieniem przekroju żyły w cm .



Rys. 180.

2. *Linja jednotorowa niesymetryczna przepłciona.* Bierzymy dla przykładu tor, przedstawiony na rys. 175. W celu osiągnięcia symetrii wypadnie tor podzielić na trzy odcinki i przepleść (schemat p. str. 301). Pojemność wypadkowa przewodu A wyrazi się wzorem ogólnym (p. wyżej wzór „a”):

$$c_A = \frac{0,0242}{\log \left(\frac{\sqrt{b c}}{r} \right)} \text{ w jednostkach } \mu F/km.$$

Obliczmy pojemność wypadkową przewodu A dla odcinka 1-go (p. rys. 175):

$$c = 2b \quad (c_A)_1 = \frac{0,0242}{\log \left(\frac{\sqrt{b \cdot 2b}}{r} \right)} = 0,0242 \cdot \frac{1}{\log \left(\frac{b}{r \sqrt{2}} \right)}$$

i dla odcinka 2-go:

$$c = b \quad (c_A)_2 = \frac{0,0242}{\log\left(\frac{\sqrt{b \cdot b}}{r}\right)} = 0,0242 \cdot \frac{1}{\log\left(\frac{b}{r}\right)}.$$

Pojemność w odcinku 3-im będzie taka sama, jak w 1-ym. Pojemność całego przewodu A będzie średnią arytmetyczną z trzech obliczonych wartości:

$$\begin{aligned} c_A &= \frac{1}{3} \left[(c_A)_1 + (c_A)_2 + (c_A)_3 \right] = \\ &= 0,0242 \cdot \frac{1}{3} \left\{ \underbrace{\frac{1}{\log\left(\frac{b}{r} \sqrt{2}\right)}}_{(1)} + \underbrace{\frac{1}{\log\left(\frac{b}{r}\right)}}_{(2)} + \underbrace{\frac{1}{\log\left(\frac{b}{r} \sqrt{2}\right)}}_{(3)} \right\}, \end{aligned}$$

czyli

$$c_A = 0,008 \left\{ \frac{2}{\log\left(\frac{b}{r} \sqrt{2}\right)} + \frac{1}{\log\left(\frac{b}{r}\right)} \right\} \dots \mu F/km. \quad (183)$$

3. *Linja dwutorowa symetryczna* (rys. 176). Obliczamy potencjał wypadkowy przewodu A_1 :

$$\begin{aligned} V_{A_1} &= V_{A_1 A_1} + V_{A_2 A_1} + V_{B_1 A_1} + V_{B_2 A_1} + V_{C_1 A_1} + V_{C_2 A_1} = \\ &= 2Q \left(\ln \frac{a_1'}{r_1} + \ln \frac{a_2'}{a_2} - \frac{1}{2} \ln \frac{b_1'}{b_1} - \frac{1}{2} \ln \frac{b_2'}{b_2} - \frac{1}{2} \ln \frac{c_1'}{c_1} - \frac{1}{2} \ln \frac{c_2'}{c_2} \right) = \\ &= 2Q \ln \left(\frac{a_1' a_2' \sqrt{b_1 b_2 c_1 c_2}}{r_1 a_2 \sqrt{b_1' b_2' c_1' c_2'}} \right). \end{aligned}$$

Bok sześciokąta oznaczamy przez b :

$$b_2 = c_2 = b \quad c_1 = b_1 = \sqrt{3} \cdot b \quad a_2 = 2b$$

i obliczamy pojemność:

$$c_{A_1} = \frac{0,0242}{\log\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{b}{r_1} \cdot \frac{a_1' a_2'}{\sqrt{b_1' b_2' c_1' c_2'}}\right)} \text{ w jednostkach } \mu F/km,$$

$$c_{A_1} \approx \frac{0,0242}{\log \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{b}{r_1} \right)} = \frac{0,0242}{\log \left(0,866 \cdot \frac{b}{r_1} \right)} \text{ w jednostkach } \mu F/km.$$

Pojemność przewodu A_2 będzie miała tę samą wartość, a pojemność podwójnego przewodu $A_1 + A_2$ wypadnie dwa razy większa:

$$c_A = \frac{0,0484}{\log \left(0,866 \cdot \frac{b}{r_1} \right)} \text{ w jednostkach } \mu F/km. \quad (184)$$

4. *Linja dwutorowa niesymetryczna przepleciona.* Bierzemy dla przykładu linję, przedstawioną na rys. 177. Pojemność przewodu A_1 wyrazi się wzorem ogólnym:

$$c'_{A_1} = \frac{1}{2 \ln \left(\frac{a_1' a_2' \sqrt{b_1 b_2 c_1 c_2}}{r_1 a_2 \sqrt{b_1' b_2' c_1' c_2'}} \right)} \text{ w jednostkach (cgs)}$$

$$c_{A_1} \approx \frac{0,0242}{\log \left(\frac{\sqrt{b_1 b_2 c_1 c_2}}{r_1 a_2} \right)} \text{ w jednostkach } \mu F/km.$$

Linję doprowadzimy do symetrii, dzieląc ją na trzy odcinki i przeplatając oba tory tak, aby skręcały się w kierunkach odwrotnych. Schemat przeplatania podaliśmy wyżej (str. 303).

Obliczmy pojemność wypadkową przewodu A_1 dla odcinka 1-go (p. rys. 177):

$$a_2 = \sqrt{5} \cdot b \quad b_1 = b \quad b_2 = \sqrt{2} \cdot b \quad c_1 = 2b \quad c_2 = b$$

$$(c_{A_1})_1 = \frac{0,0242}{\log \left[\frac{\sqrt{b \cdot \sqrt{2} \cdot b \cdot 2b \cdot b}}{r_1 \sqrt{5} \cdot b} \right]} = 0,0242 \cdot \frac{1}{\log \left[\frac{b}{r_1} \cdot \frac{\sqrt{1 \cdot \sqrt{2} \cdot 2 \cdot 1}}{\sqrt{5}} \right]}.$$

W ten sam sposób obliczymy pojemności dla wszystkich trzech odcinków. Pojemność całego przewodu A_1 będzie średnią arytmetyczną z trzech obliczonych wartości:

$$c_{A_1} = \frac{1}{3} \left[(c_{A_1})_1 + (c_{A_1})_2 + (c_{A_1})_3 \right] =$$

$$= 0,008 \left\{ \underbrace{\frac{1}{\log \left[\frac{b}{r_1} \cdot \frac{\sqrt{1 \cdot \sqrt{2} \cdot 2}}{\sqrt{5}}} \right]}}_{(1)} + \underbrace{\frac{1}{\log \left[\frac{b}{r_1} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot \sqrt{2}}}{\sqrt{5}}} \right]}}_{(2)} + \underbrace{\frac{1}{\log \left[\frac{b}{r_1} \cdot \frac{\sqrt{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2}}}{1} \right]}}_{(3)} \right\}.$$

Pojemność przewodu A_2 będzie miała tę samą wartość, a pojemność podwójnego przewodu $A_1 + A_2$, czyli całej fazy A , wypadnie dwa razy większa:

$$c_A = 0,016 \left\{ \frac{2}{\log \left(\frac{b}{r_1} \sqrt{\frac{2}{5}} \right)} + \frac{1}{\log \left(\frac{b}{r_1} \sqrt{2} \right)} \right\} \text{ w jednostkach } \mu F/km. \quad (185)$$

5. *Linja wielotorowa*, złożona z n torów, połączonych równolegle (rys. 178):

$$A_1 - B_1 - C_1; \dots \quad A_\alpha - B_\alpha - C_\alpha; \dots \quad A_n - B_n - C_n.$$

Potencjał wypadkowy dowolnego przewodu A_1 wyniesie:

$$\begin{aligned} V_{A_1} &= 2Q \ln \left(\frac{a_1' a_2' \dots a_\alpha' \dots a_n' \sqrt{b_1 b_2 \dots b_\alpha \dots b_n c_1 c_2 \dots c_\alpha \dots c_n}}{r_1 a_2 \dots a_\alpha \dots a_n \sqrt{b_1' b_2' \dots b_\alpha' \dots b_n' c_1' c_2' \dots c_\alpha' \dots c_n'}} \right) = \\ &= 2Q \ln \left(\frac{\sqrt{b_1 b_2 \dots b_\alpha \dots b_n c_1 c_2 \dots c_\alpha \dots c_n}}{r_1 a_2 \dots a_\alpha \dots a_n} \cdot \frac{a_1' a_2' \dots a_\alpha' \dots a_n'}{\sqrt{b_1' b_2' \dots b_\alpha' \dots b_n' c_1' c_2' \dots c_\alpha' \dots c_n'}} \right) \approx \\ &\approx 2Q \ln \left(\frac{\sqrt{b_1 b_2 \dots b_\alpha \dots b_n c_1 c_2 \dots c_\alpha \dots c_n}}{r_1 a_2 \dots a_\alpha \dots a_n} \right); \end{aligned}$$

stąd pojemność tego przewodu wyrazi się przybliżonym wzorem ogólnym:

$$\left| c_{A_1} \approx \frac{0,0242}{\log \left(\frac{\delta}{r_1} \right)} \dots \mu F/km \quad \delta = \frac{\sqrt{b_1 b_2 \dots b_\alpha \dots b_n c_1 c_2 \dots c_\alpha \dots c_n}}{a_2 \dots a_\alpha \dots a_n} \right| \quad (186)$$

Ze wzoru powyższego można wyprowadzić wzory poprzednie: (181), (183), (184) i (185).

Pojemność przewodu pojedynczego wyraża się wzorem jednokowym zarówno dla linii jednofazowej (wzór 157), jak trójfazowej (wzór 186); różnica zachodzi tylko co do wielkości δ . Wielkość zaś δ we wzorze (186) jest ta sama, co we wzorze (179).

Pojemność wypadkowa wszystkich n przewodów biegunowości A równa się sumie pojemności tych przewodów:

$$c_A = c_{A_1} + c_{A_2} + \dots + c_{A_\alpha} + \dots + c_{A_n}.$$

Gdyby pojemności wszystkich przewodów były jednakowe:

$$c_{A_1} = c_{A_2} = \dots = c_{A_\alpha} = \dots = c_{A_n} = c,$$

wówczas pojemność wypadkowa wszystkich n przewodów o biegunowości A byłaby n razy większa od pojemności przewodu pojedynczego:

$$[c_A = nc].$$

Strata prądu wskutek pojemności wypadkowej w biegunie A oblicza się wg wzoru, podobnego do (147):

$$[\Delta I^e = e 2 \pi f c_A 10^{-6}]. \quad (187)$$

Uptywność. W torach trójfazowych uptywność oblicza się zupełnie tak samo, jak w torach jednofazowych (§ 53), i wg tych samych wzorów: od (158) do (166) włącznie. Jedynie tylko odległość umyślona δ we wzorze (162) będzie miała inną wartość (patrz wzory: 179 i 186):

$$\delta = \frac{\sqrt{b_1 b_2 \dots b_\alpha \dots b_n c_1 c_2 \dots c_\alpha \dots c_n}}{a_2 \dots a_\alpha \dots a_n}.$$

Wykres wektorowy będziemy budowali dla jednego tylko przewodu. Bieg obliczenia wykreślonego i rachunkowego pozostanie taki, jak w § 53, lecz, zamiast napięć międzyprzewodowych: E_α , E_β , $\overline{\Delta E}^r$, $\overline{\Delta E}^l$, wejdą napięcia gwiazdowe: e_α , e_β , $\overline{\Delta e}^r$, $\overline{\Delta e}^l$. Wzór (149) przybierze zatem postać następującą:

$$\left. \begin{aligned} e_\alpha &= \sqrt{\left[e_\beta \cos \varphi_2 + \overline{\Delta e}^r \right]^2 + \left[e_\beta \sin (\pm \varphi_2) - \overline{\Delta e}^l \right]^2} \\ \operatorname{tg} \varphi_1 &= \frac{e_\beta \sin (\pm \varphi_2) - \overline{\Delta e}^l}{e_\beta \cos \varphi_2 + \overline{\Delta e}^r} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} (+ \text{wyrzedzanie} \\ - \text{opóźnianie}). \end{array} \quad (188)$$

Przykład 80. Projektuje się napowietrzną linię dwutorową o długości 125 km dla przesyłania 50 000 kW przy obciążeniu indukcyjnym: $\cos \varphi_\beta = 0,8$. Napięcie na krańcu toru 100 000 V. Częstotliwość 50. Układ niesymetryczny, zgodny z rys. 177, przepleciony. Przewody miedziane o przekroju 70 mm². Odległości między przewodami (poziome i pionowe) ... 325 cm. Obliczyć spadek napięcia, spadek prądu i stratę mocy.

Z trzech biegunów rozpatrujemy tylko jeden A , który jest złożony z dwóch przewodów: A_1 i A_2 , połączonych równolegle, i obliczamy oporność:

$$r_A = \frac{r_{A_1}}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{125\,000}{57 \cdot 70} = 15,664 \, \Omega,$$

indukcyjność (wg. wzoru 178):

$$l_A = \frac{l_{A_1}}{2} = 2,3 \log \left(0,928 \cdot \frac{325}{0,78 \cdot 0,53} \right) 10^{-4} \cdot 125 = 0,0823 \text{ H}$$

i pojemność (wg. wzoru 185):

$$c_A = 2 c_{A_1} = 0,016 \left\{ \frac{2}{\log \left(\frac{325}{0,53} \sqrt{\frac{2}{5}} \right)} + \frac{1}{\log \left(\frac{325}{0,53} \sqrt{2} \right)} \right\} \cdot 125 = 2,193 \text{ } \mu F.$$

Dla sprawdzenia osłgniętych wyników obliczamy iloczyn $l_A \cdot c_A$ na 1 km długości:

$$\frac{0,0823}{125} \cdot \frac{2,193}{125} = 0,0000115 \text{ H} \cdot \mu F.$$

Iloczyn ten, jak podawaliśmy wyżej (str. 271), powinien być zawarty w granicach od 0,0000111 do 0,0000116.

Uptywność przez izolację jednego przewodu może dojść (wzór 160) do 0,0000002 Ω^{-1}/km , a więc upływność obu przewodów jednakowej blegunowości —

$$\alpha_A^{is} = \alpha_{A_1}^{is} + \alpha_{A_2}^{is} = 2 \cdot 0,0000002 \cdot 125 = 0,00005 \Omega^{-1}.$$

Obliczamy napięcie krytyczne wg wzoru (161) dla $B = 75 \text{ cm}$ i $t^0 = 18^0 C..$

$$e_{kr} = 4590 \cdot 0,8 \cdot \frac{75}{273 + 18} \left(\frac{0,53}{\frac{2,193}{2,125}} \right) = 57180 \text{ V}.$$

Napięcie gwiazdowe na krańcu toru $e_s = \frac{100000}{\sqrt{3}} = 57730 \text{ V}$ jest wyższe od krytycznego, a więc ulot występuje na całej długości toru.

Chcąc obliczyć upływność od ulotu, należy przedtem znaleźć napięcie na początku toru. W tym celu obliczamy to napięcie prowizorycznie tak, jak gdyby ulotu nle było. Otrzymujemy:

$$e_u \approx 67500 \text{ V}.$$

Do wzoru na obliczanie ulotności wchodzi między innymi wyraz $\sqrt{\frac{r}{\delta}}$. Ponieważ tor nasz jest trzykrotnie przepleciony, przeto trzeba obliczyć ten wyraz oddzielnie dla każdego odcinka i do wzoru wprowadzić wartość średnią. Dla odcinka 1-go (układ na rys. 177):

$$\delta_1 = 325 \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{2} \cdot 2}{5}} = 244,4 \text{ cm} \quad \sqrt{\frac{r}{\delta_1}} = \sqrt{\frac{0,53}{244,4}} = 0,0466.$$

Dla trzech odcinków średnia wartość wyrazu $\sqrt{\frac{r}{\delta}}$ wyniesie :

$$\sqrt{\frac{r}{\delta}} = \frac{1}{3} \left\{ \begin{array}{ccc} (1) & (2) & (3) \end{array} \right. 0,0466 + 0,0466 + 0,034 \left. \right\} = 0,0424.$$

A zatem strata mocy na ulot dla jednego przewodu wyniesie wg wzorów: (162) i (164):

$$\Delta p_{A,}^{ul} = \frac{87,8 (273 + 18)}{75} 50 \cdot 0,0424 \left\{ \frac{(67500 - 57180)^2 + (57730 - 57180)^2}{2} \right\} 10^{-8} =$$

$$= 385,6 \text{ W/km.}$$

Strata mocy w obu przewodach jednakowej biegunowości będzie dwa razy większa, a strata na długości 125 km wyniesie:

$$\Delta p_A^{ul} = 385,6 \cdot 2 \cdot 125 = 96400 \text{ W.}$$

Uptywność od ulotu obu przewodów wspólnej fazy wyniesie wg wzorów (158) i (164):

$$\alpha_A^{ul} = \frac{96400}{\frac{1}{2} (67500^2 + 57730^2)} = 0,000024 \text{ } \Omega^{-1}.$$

Uptywność wypadkowa jednej fazy wyniesie:

$$\alpha_A = \alpha_A^{is} + \alpha_A^{ul} = 0,00005 + 0,000024 = 0,000074 \text{ } \Omega^{-1}.$$

Bieg obliczania będzie następujący:

$$I_s = \frac{50\,000\,000}{\sqrt{3} \cdot 100\,000 \cdot 0,8} = 361 \text{ A}; \quad \overline{\Delta I_s^a} = 57730 \cdot \frac{0,000074}{2} = 2,14 \text{ A};$$

$$\overline{\Delta I_s^c} = 57730 \cdot 2 \pi 50 \cdot \frac{2,193}{2} \cdot 10^{-6} = 19,89 \text{ A};$$

$$I = \sqrt{[361 \cdot 0,8 + 2,14]^2 + [361 \cdot (-0,6) + 19,89]^2} = 351,3 \text{ A};$$

$$\varphi_2 = -34^{\circ}3'; \quad \overline{\Delta e^r} = 351,3 \cdot 15,664 = 5503 \text{ V};$$

$$\overline{\Delta e^l} = 351,3 \cdot 2 \pi 50 \cdot 0,0823 = 9081 \text{ V};$$

$$e_a = \sqrt{[57730 \cos 34^{\circ}3' + 5503]^2 + [57730 \sin (-34^{\circ}3') - 9081]^2} = 67520 \text{ V}$$

$$\varphi_1 = -37^{\circ}50'; \quad \overline{\Delta I_a^a} = 67520 \cdot \frac{0,000074}{2} = 2,5 \text{ A};$$

$$\overline{\Delta I_a^c} = 67520 \cdot 2 \pi 50 \cdot \frac{2,193}{2} \cdot 10^{-6} = 23,25 \text{ A};$$

$$I_a = \sqrt{[351,3 \cos 37^{\circ}50' + 2,5]^2 + [351,3 \sin (-37^{\circ}50') + 23,25]^2} = 339,7 \text{ A};$$

$$\varphi_a = -34^{\circ}28'; \quad P_a = 3 \cdot 67520 \cdot 339,7 \cdot \cos 34^{\circ}28' = 56731250 \text{ W};$$

$$E_a = \sqrt{3} \cdot 67520 = 116951 \text{ V}; \quad \Delta E_{as} = 116951 - 100000 = 16951 \text{ V};$$

$$\Delta I_{as} = 339,7 - 361 = -21,3 \text{ A (wzrost!)};$$

$$\Delta P_{as} = 56731250 - 50000000 = 6731250 \text{ W.}$$

Rys. 181 przedstawia rozwiązanie wykreślne tego zadania. Straty prądu od upływu przez izolację i od ulotu wypadły tak niki, że pominęliśmy je na wykresie.

§ 57. Oporność pozorna.

Przy zastosowaniu metody matematycznie ściślej do linii trójfazowych będziemy rozpatrywali każdy przewód z osobna tak, jak w metodzie poprzedniej. Cały przebieg wyprowadzania równań podstawowych i wzorów pomocniczych po-

zostanie bez zmiany, gdy, zamiast napięć międzyprzewodowych: E_p , E_p , \hat{E}_p , wprowadzimy napięcia gwiazdowe: e_p , e_p , \hat{e}_p i gdy, zamiast oporności, indukcyjności, pojemności, upływności i oporności pozornej toru dwuprzewodowego: R , L , C , A i \hat{Z}_p , wprowadzimy odpowiednie wielkości dla przewodu pojedynczego: r , l , c , α i \hat{z}_p .

Symbol napięcia gwiazdowego będzie następujący:

$$e_p \approx j(\omega t) = \hat{e}_p,$$

a oporności pozorne przewodu pojedynczego wg wzorów (167) i (168):

$$\hat{z}_{pz}^o = \frac{\hat{e}_p^o}{\hat{I}_p^o} = u \frac{\varepsilon^{vx} + \varepsilon^{-vx}}{\varepsilon^{vx} - \varepsilon^{-vx}} \quad (189)$$

$$\hat{z}_{pz}^z = \frac{\hat{e}_p^z}{\hat{I}_p^z} = u \frac{\varepsilon^{vx} - \varepsilon^{-vx}}{\varepsilon^{vx} + \varepsilon^{-vx}}. \quad (190)$$

Wzory podstawowe (169) i (170) dla przewodu pojedynczego przybiorą następującą postać:

$$\hat{e}_p = S_{pz} \left[\hat{e}_z + \hat{I}_z \hat{z}_{pz}^z \right] \quad (191)$$

$$\hat{I}_p = S_{pz} \left[\hat{I}_z + \frac{\hat{e}_z}{\hat{z}_{pz}^o} \right] \quad (192)$$

Rys. 181.

przyczem współczynnik linowy będzie się wyrażał stosunkiem napięcia gwiazdowego w stanie jałowym w dowolnym punkcie p do napięcia na krańcu toru (por. wzór 171):

$$\hat{S}_{pz} = \frac{\hat{e}_p^o}{\hat{e}_z^o}. \quad (193)$$

Wzory (172) do obliczania oporności pozornych odcinka toru \overline{pz} o długości $l_{pz} = x$, gdy znane są oporności pozorne innego odcinka \overline{bz} o długości $l_{bz} = l$ z tego samego toru, pozostają w swej mocy z tą tylko zmianą, że, zamiast oporności całego toru, wystąpią oporności jednego przewodu:

$$\left. \begin{aligned} \hat{z}_{pz}^o &= \sqrt{\hat{z}_{bz}^o \hat{z}_{bz}^s} \cdot \frac{q^{\frac{x}{l}} + 1}{q^{\frac{x}{l}} - 1} & \hat{z}_{pz}^s &= \sqrt{\hat{z}_{bz}^o \hat{z}_{bz}^s} \cdot \frac{q^{\frac{x}{l}} - 1}{q^{\frac{x}{l}} + 1} \\ q &= \frac{\sqrt{\hat{z}_{bz}^o} + \sqrt{\hat{z}_{bz}^s}}{\sqrt{\hat{z}_{bz}^o} - \sqrt{\hat{z}_{bz}^s}} \end{aligned} \right\} \quad (194)$$

Wzór (173) do obliczania modułu współczynnika linowego pozostaje bez żadnej zmiany:

$$S_{pz} = \frac{1}{2} \sqrt{\varepsilon^{\frac{2ax}{b}} + \varepsilon^{-\frac{2ax}{b}} + 2 \cos(2bx)}.$$

Wreszcie współczynniki a i b , wchodzące do wzoru powyższego, obliczymy, znając oporności pozorne odcinka toru yz (por. wzór 174):

$$a \approx \frac{1}{l_{yz}} \sqrt{\frac{\hat{z}_{yz}^s}{\hat{z}_{yz}^o} \cdot \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\varphi_{yz}^s - \varphi_{yz}^o}{2} \right)}} \quad b \approx a \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\varphi_{yz}^s - \varphi_{yz}^o}{2} \right). \quad (195)$$

Przykład 81. Projektuje się tor kablowy długości 50 km, łączący stację odbiorczą z elektrownią. Elektrownia wytwarza prąd trójfazowy o częstotliwości 50 i o stałym napięciu międzyprzewodowym 10 500 V. Największe przewidywane obciążenie indukcyjne na krańcu toru 300 kW przy $\cos \varphi = 0,8$. Obliczyć przekrój żył kablowych na 8% dopuszczalnego spadku napięcia.

Wg danych fabrycznych oporności pozorne kabli trójżyłowych do 10 000 V przy częstotliwości 50 i długości 50 km są następujące:

$3 \times 10 \text{ mm}^2$	$\hat{z}^o = 488,7 \varepsilon - j(86^\circ 19')$	$\hat{z}^s = 91,00 \varepsilon j(1^\circ 13')$	$S = 0,995$
$3 \times 16 \text{ „}$	$444,0 \varepsilon - j(87^\circ 32')$	$56,30 \varepsilon j(4^\circ 41')$	0,994
$3 \times 25 \text{ „}$	$394,2 \varepsilon - j(88^\circ 09')$	$36,47 \varepsilon j(8^\circ 1')$	0,993
$3 \times 35 \text{ „}$	$367,2 \varepsilon - j(88^\circ 35')$	$26,36 \varepsilon j(11^\circ 32')$	0,993
$3 \times 50 \text{ „}$	$343,8 \varepsilon - j(88^\circ 55')$	$18,80 \varepsilon j(16^\circ 7')$	0,992
$3 \times 70 \text{ „}$	$322,8 \varepsilon - j(89^\circ 14')$	$13,86 \varepsilon j(21^\circ 39')$	0,992
$3 \times 95 \text{ „}$	$307,2 \varepsilon - j(89^\circ 22')$	$10,73 \varepsilon j(27^\circ 31')$	0,992
$3 \times 120 \text{ „}$	$296,5 \varepsilon - j(89^\circ 24')$	$8,92 \varepsilon j(32^\circ 27')$	0,992

Napięcie gwiazdowe elektrowni wynosi:

$$e_a = \frac{1}{\sqrt{3}} 10\,500 = 6062 \text{ V.}$$

napięcie na krańcu ma wynosić:

$$e_s = 0,92 \cdot 6062 = 5577 \text{ V},$$

a prąd odbierany:

$$I_s = \frac{300\,000}{3 \cdot 5577 \cdot 0,8} = 22,41 \text{ A}.$$

Zadanie rozwiążemy wykreślnie wg wzoru (191):

$$\frac{\hat{e}_a}{\hat{S}_{as}} = \hat{e}_s + \hat{I}_s \hat{z}_{as}^s. \quad (\text{a})$$

Za podstawę bierzemy wektor napięcia e_s :

$$\begin{aligned} \hat{e}_s &= 5577 \varepsilon j(\omega t) & \hat{I}_s &= 22,41 \varepsilon j(\omega t - 36^\circ 52') \\ \frac{\hat{e}_a}{\hat{S}_{as}} &= \frac{6062}{\hat{S}_{as}} \varepsilon j(\omega t + \alpha) & \hat{z}_{as}^s &= z_{as}^s \varepsilon j(\varphi_a^s) \end{aligned}$$

podstawiamy te wartości do wzoru (a):

$$\underbrace{\frac{6062}{\hat{S}_{as}} \varepsilon j(\omega t + \alpha)}_{\text{iloraz napięcia u źródła przez sp. linjowy}} = \left[\underbrace{5577 \varepsilon j(\omega t)}_{\text{napięcie na krańcu}} + \underbrace{22,41 \cdot z_{as}^s \varepsilon j(\omega t - 36^\circ 52' + \varphi_a^s)}_{\text{strata napięcia}} \right]. \quad (\text{b})$$

Obliczamy stratę napięcia przy zastosowaniu kabla $3 \times 10 \text{ mm}^2$:

$$\hat{I}_s \hat{z}_{as}^s = 22,41 \cdot 91,00 \varepsilon j(\omega t - 36^\circ 52' + 1^\circ 13') = 2039,3 \varepsilon j(\omega t - 35^\circ 39'),$$

a następnie obliczamy stratę przy zastosowaniu kabli o innych przekrojach:

$$\begin{array}{ll} 3 \times 16 \text{ mm}^2 & \hat{I}_s \hat{z}_{as}^s = 1261,17 \varepsilon j(\omega t - 32^\circ 11') \\ 3 \times 25 \text{ " } & \text{" } 817,3 \varepsilon j(\omega t - 28^\circ 51') \\ 3 \times 35 \text{ " } & \text{" } 590,73 \varepsilon j(\omega t - 25^\circ 20') \\ 3 \times 50 \text{ " } & \text{" } 421,1 \varepsilon j(\omega t - 20^\circ 45') \\ 3 \times 70 \text{ " } & \text{" } 310,6 \varepsilon j(\omega t - 15^\circ 13') \\ 3 \times 95 \text{ " } & \text{" } 240,46 \varepsilon j(\omega t - 9^\circ 21') \\ 3 \times 120 \text{ " } & \text{" } 199,9 \varepsilon j(\omega t - 4^\circ 25') \end{array}$$

Budujemy wykres (rys. 182). Odkładamy wektor napięcia na krańcu $oa = 5577 \text{ V}$ i dodajemy do niego geometrycznie: 1) stratę napięcia przy przekroju $3 \times 10 \text{ mm}^2$ w postaci wektora $ab = 2039,3 \text{ V}$, opóźniającego się o $\angle kab = -35^\circ 39'$; 2) stratę przy $3 \times 16 \text{ mm}^2$ w postaci $ac = 1261,17 \text{ V}$, $\angle kac = -32^\circ 11'$ i t. d. W ten sposób otrzymujemy punkty: b, c, d, e, f, g, h, i , odpowiadające przekrojom: 10, 16, 25, 35, 50, 70, 90 i 120 mm^2 .

Jak widać z równania (b), suma geometryczna napięcia na krańcu i straty napięcia ma się równać ilorazowi napięcia u źródła przez współczynnik linjowy. Współczynnik ten w naszym przykładzie zmienia się, zależnie od przekroju, w granicach:

od 0,995 do 0,992, a więc iloraz $\frac{e_a}{S_{as}}$ zmienia się również:

$$\text{od } \frac{6062}{0,995} = 6092,6 \text{ V} \quad \text{do } \frac{6062}{0,992} = 6111 \text{ V}.$$

Zataczamy dwa łuki z punktu O promieniami, odpowiadającymi napięciom:

$$6092,6 \text{ V i } 6111 \text{ V}.$$

Strefa, zawarta między temi łukami, przebiega najbliżej punktu e, a więc wypada wyznaczyć przekrój:

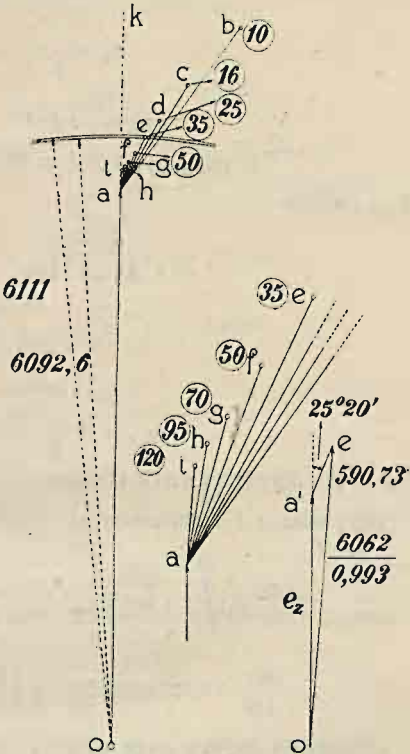
$$s = 35 \text{ mm}^2.$$

Dla sprawdzenia obliczymy napięcie e_z , które będzie panowało na krańcu toru przy zastosowaniu kabia o przekroju $3 \times 35 \text{ mm}^2$. Z trójkąta $oa'e$ (rys. 182, wykres dodatkowy) znajdujemy:

$$e_z = \sqrt{\left(\frac{6062}{0,993}\right)^2 - (590,73 \sin 25^\circ 20')^2} -$$

$$- 590,73 \cos 25^\circ 20' = 5576 \text{ V}.$$

Zbiegiem okoliczności osiągnęliśmy zupełnie ściśle przepisany spadek napięcia.



Rys. 182.

Przykład 82. Projektuje się napowietrzną linię dwutorową o długości 125 km dla obciążenia indukcyjnego na krańcu linii o współczynniku mocy $\cos \varphi_s = 0,8$. Napięcie na krańcu toru 100 000 V. Częstotliwość 50. Obliczyć dopuszczalną moc obciążenia, przy której spadek napięcia nie przekraczałby 10%.

Pomiar próbny, wykonany na odcinku 100 m, wykazał: 1) w stanie jałowym:

$$E_y^o = 100\,000 \text{ V}; \quad I_y^o = 0,03046 \text{ A}; \quad P_y^o = 400,16 \text{ W};$$

2) w stanie zwarcia:

$$E_y^z = 13 \text{ V}; \quad I_y^z = 180 \text{ A}; \quad P_y^z = 2\,109,7 \text{ W}.$$

1. Oporności pozorne na odcinku 100-metrowym.
Stan jałowy:

$$\cos \varphi_y^o = \frac{400,16}{\sqrt{3} \cdot 100\,000 \cdot 0,03046} = 0,07585; \quad \varphi_y^o = 85^{\circ}39';$$

$$e_y^o = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 100\,000 = 57\,730 \text{ V};$$

$$\hat{z}_{ys}^o = \frac{57\,730 \varepsilon j(\omega t)}{0,03046 \varepsilon j(\omega t + 85^{\circ}39')} = 1\,895\,300 \varepsilon j(-85^{\circ}39').$$

Stan zwarcia:

$$\cos \varphi_y^s = \frac{2109,7}{\sqrt{3} \cdot 13 \cdot 180} = 0,5205; \quad \varphi_y^s = 58^{\circ}38';$$

$$e_y^s = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 13 = 7,506 \text{ V};$$

$$\hat{z}_{ys}^s = \frac{7,506 \varepsilon j(\omega t)}{180 \varepsilon j(\omega t - 58^{\circ}38')} = 0,0417 \varepsilon j(+58^{\circ}38').$$

2. Spółczynnik linjowy całej linii.

Spółczynniki a i b obliczamy ze wzorów (195):

$$a \approx \frac{1}{0,1} \sqrt{\frac{0,0417}{1\,895\,300} \cdot \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \left(\frac{58^{\circ}38' + 85^{\circ}39'}{2} \right)}} = 0,000455;$$

$$b \approx 0,000455 \operatorname{tg} \left(\frac{58^{\circ}38' + 85^{\circ}39'}{2} \right) = 0,001412,$$

a spółczynnik linjowy — ze wzoru (173):

$$S_{as} = \frac{1}{2} \sqrt{(2 \cdot 0,000455 \cdot 125) + \varepsilon - (2 \cdot 0,000455 \cdot 125) + 2 \cos(2 \cdot 0,001412 \cdot 125)} = 0,998.$$

3. Oporności pozorne całej linii:

$$l_{ys} = l = 0,1 \text{ km}; \quad l_{as} = x = 125 \text{ km}; \quad \hat{z}_{ys}^o = 1\,895\,300 \varepsilon j(-85^{\circ}39');$$

$$\hat{z}_{ys}^s = 0,0417 \varepsilon j(+58^{\circ}38'); \quad \hat{z}_{as}^o = ?; \quad \hat{z}_{as}^s = ?.$$

Posiłkujemy się wzorem (194):

$$\sqrt{\hat{z}_{ys}^o} = 1376,7 \varepsilon j(-42^{\circ}49'30''); \quad \sqrt{\hat{z}_{ys}^s} = 0,2042 \varepsilon j(+29^{\circ}19');$$

$$\sqrt{\hat{z}_{ys}^o \hat{z}_{ys}^s} = 281,13 \varepsilon j(-13^{\circ}30'30''); \quad ,$$

$$q = \frac{1376,7 \varepsilon j (-42^{\circ}49'30'') + 0,2042 \varepsilon j (+29^{\circ}19')}{1376,7 \varepsilon j (-42^{\circ}49'30'') - 0,2042 \varepsilon j (+29^{\circ}19')} =$$

$$= \frac{1009,90 - j \cdot 935,72}{1009,54 - j \cdot 935,92} = \frac{1376,8 \varepsilon j (-42^{\circ}49')}{1376,6 \varepsilon j (-42^{\circ}50')} = 1,00014 \varepsilon j (+0^{\circ}1');$$

$$q^{\frac{x}{t}} = (1,00014 \varepsilon j (+0^{\circ}1'))^{\frac{125}{0,1}} = 1,1919 \varepsilon j (20^{\circ}50');$$

$$\frac{q^{\frac{x}{t}} + 1}{q^{\frac{x}{t}} - 1} = \frac{1,1919 \varepsilon j (20^{\circ}50') + 1}{1,1919 \varepsilon j (20^{\circ}50') - 1} = \frac{2,114 + j \cdot 0,4239}{0,114 + j \cdot 0,4239} = \frac{2,156 \varepsilon j (11^{\circ}20')}{0,439 \varepsilon j (74^{\circ}57')} =$$

$$= 4,9116 \varepsilon j (-63^{\circ}37');$$

$$\frac{q^{\frac{x}{t}} - 1}{q^{\frac{x}{t}} + 1} = \frac{0,439 \varepsilon j (74^{\circ}57')}{2,156 \varepsilon j (11^{\circ}20')} = 0,2036 \varepsilon j (+63^{\circ}37').$$

Oporności pozorne wypadną następujące:

$$z_{as}^o = 281,13 \varepsilon j (-13^{\circ}30'30'') \cdot 4,9116 \varepsilon j (-63^{\circ}37') = 1380,8 \varepsilon j (-77^{\circ}7'30'')$$

$$z_{as}^a = 281,13 \varepsilon j (-13^{\circ}30'30'') \cdot 0,2036 \varepsilon j (+63^{\circ}37') = 57,24 \varepsilon j (+50^{\circ}6'30'').$$

Dla zorjentowania się obliczymy moduły wg wzorów przybliżonych, a ważnych tylko dla krótkich odcinków (str. 291):

$$z_{as}^o \approx 1895300 \cdot \frac{0,1}{125} = 1516 \quad z_{as}^a \approx 0,0417 \cdot \frac{125}{0,1} = 52$$

i porównamy przyrosty kątów odchyłu (str. 292, wzór „s^a“):

$$(-85^{\circ}39') - (-77^{\circ}7'30'') = -8^{\circ}31'30'' \quad (58^{\circ}38') - (50^{\circ}6'30'') = 8^{\circ}31'30''.$$

Jakkolwiek obliczenie było wykonane metodą zupełnie ścisłą, to jednak wyniki mogą być niezbyt dokładne wskutek znacznej różnicy, zachodzącej między długością całego toru a długością odcinka próbnego.

4. Obciążenie dopuszczalne.

Napięcie u źródła przy 10% dopuszczalnego spadku wyniesie:

$$E_a = \frac{100000}{0,9} = 111111 \text{ V}; \quad e_a = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 111111 = 64150 \text{ V}.$$

Zastosujemy wzór zasadniczy (191), podstawiając do niego wartości następujące:

$$\hat{e}_z = 57730 \varepsilon j(\omega t); \quad \frac{\hat{e}_a}{\hat{S}_{az}} = \frac{64150}{0,998} \varepsilon j(\omega t + \alpha) = 64280 \varepsilon j(\omega t + \alpha);$$

$$\begin{aligned}\hat{I}_z \hat{z}_{az}^z &= I_z e^{j(\omega t - 36^\circ 52')} \cdot 57,24 e^{j(+50^\circ 6' 30')} = \\ &= I_z \cdot 57,24 e^{j(\omega t + 13^\circ 14' 30'')}\end{aligned}$$

Zadanie rozwiążemy wykreślnie (rys. 183). Odkładamy wektor $oa = e_a = 57730 \text{ V}$; kreślimy prostą al , wyprzedzającą poprzedni wektor o $13^\circ 14' 30''$, wreszcie zataczamy łuk z punktu o promieniem:

$$\frac{e_a}{S_{az}} = 64280 \text{ V}.$$

Łuk ten przecina prostą al w punkcie b .

Odcinek ab przedstawia stratę napięcia:

$$I_z z_{az}^z = I_z \cdot 57,24 \text{ V}.$$

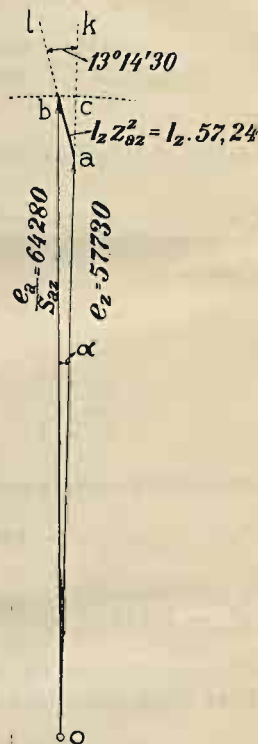
Zmierzywszy długość odcinka ab , znajdziemy wartość tej straty w woltach, a dzieląc tę liczbę przez 57,24, otrzymamy natężenie prądu odbieranego w amperach.

Chcąc rozwiązać zadanie rachunkowo, przypuszczamy, że odcinek łuku bc (rys. 183) jest linią prostą, prostopadłą do ac

$$\begin{aligned}\overline{ab} &\approx \frac{\overline{ac}}{\cos(13^\circ 14' 30'')} = \frac{64280 - 57730}{\cos(13^\circ 14' 30'')} = \\ &= 6728 \text{ V} = I_z \cdot 57,24 \\ I_z &\approx \frac{6728}{57,24} = 117,55 \text{ A}.\end{aligned}$$

A zatem obciążenie dopuszczalne, przy którym spadek napięcia nie przekroczy 10%, wyniesie:

$$P_z = \sqrt{3} \cdot 100000 \cdot 117,55 \cdot 0,8 = 15\,917\,500 \text{ W}.$$



Rys. 183.

Skorowidz alfabetyczny.

(Liczby oznaczają № № stron).

Amortyzacja p. umorzenie.
Asymetryczny p. niesymetryczny.

Biegun 15; — pomocniczy 24.
Bok sieci 4.

Charakterystyczna oporność linii 281.
Chyb 72.

Czas trwania największych strat 122;
(tabl.) 136.

Czas użytkowania największej mocy 135.
Czas użytkowania największego prądu
135; (tabl.) 136.

Dalekonośna linja 4, 251, 296.
Długość; — równoważna 79; — umy-
ślona 85, 97, 103, 107, 129, 196, 198.

Dopływ energii, mocy, prądu 3.
Drut; średnica — (tabl.) 145.
Dzielnik napięcia 165.

Elastyczność sieci 9.
Elektrownia; koszt — 132.

Gałąź 4.
Gęstość prądu; — gospodarczo, najko-
rzystniejsza 124; — jednostajna
91, 101.

Histeresa dielektryczna 272, 275.

Indukcyjność 251, 252, 296; — własna
251, 253; — wzajemna 252, 253.
Izolacja; oporność, przewodność — 273.

Jałowy stan 282.
Jednoczesność stopień 236, 239.

Kabel; grubość izolacji — 257; in-
dukcyjność — 256, 300; koszt —
131; nagrzewanie się — 141; po-
jemność — 267, 307.

Kąt odchyłu 281.
Kąt przesuwu fazy 179; — jednostajny
186, 213; — wypadkowy 186.

Kierunek obieg prądu 3, 19, 179; —
bezwatowego i watowego 182.

Kierunek przepływu energii 3, 179.
Koleje i tramw. elektr. 130, 155, 163.
Koszt prądu (dane liczbowe) 132.

Koszta roczne przesyłania prądu 121,
159, 197, 228; — bezpośrednio
i pośrednio 121.

Koszta zakładowe 120; — elektrowni
121, (dane liczbowe) 132; — prze-
wodów 120, (tabl.) 131; — sieci
pierwotnej i wtórnej 203, 204,
237, 238.

Lampa; — łukowa 148; — żarowa 8, 12.
Liczba zespolona 284.

Linja 4; — dalekonośna 4; — daleko-
nośna jednofazowa 251; — daleko-
konośna trójfazowa 296; — wielo-
torowa 4, 259, 269, 304, 310.

Linka; średnica — (tabl.) 145.

Moc pobierana p. pobór mocy.
Moduł 284.
Moment prądu 11.

Nagrzewanie się przewodu 139.

Napięcie; — fazowe 207, 209; — gwiazdowe 209; — krytyczne 272, 273; — międzyprzewodowe 209; — największe 165, 248; — oświetleniowe 165, 247; — robocze 7; różnica — 170; — silnikowe 165, 248; — skojarzone 209; spadek — p. spadek; strata — p. strata; wzrost — p. wzrost; zależność — od obciążenia 7; zysk — p. zysk.

Naskórkowość 199.

Niesymetryczny tor p. tor niesymetr.

Niesymetryczny układ przewodów 298, 301, 303, 307, 309.

Obciążenie; — indukcyjne 179; — mierzane 26; — opornościowe 179; — pojemnościowe 179; przekładanie — 77; przyrost — 59; — rozłożone niejednakowo 167, 174, 218, 230; — rozłożone równomiernie 21; — skupione 21.

Objętość przewodów 93, 107; — najmniejsza 94, 102; porównanie — 247.

Obliczanie przekroju; — na gęstość jednostajną 91, 101; — na gospodarność 5, 123, 128, 147, 197, 228; — na nagrzewanie 5, 139, 147, 198; — na najmniejszą objętość 94, 102, 196, 227; — na przekrój jednostajny 89, 100, 112; — na przybliżone minimum objętości 107; — na spadek napięcia 5, 89, 112, 116, 147, 194, 225, 234, 247; — na stałą sumę przekrojów 107; — na stratę mocy 195, 226, 235, 248; — na wytrzymałość mechaniczną 5, 145, 147; — przewodów do lamp łuk. 148; — przewodów skrajnych i obojętnych 175, 232.

Obwód prądu; — otwarty i zamknięty 3; — pojedynczy i skojarzony 2.

Odbiór prądu p. prąd odbierany, p. punkt odbiorczy.

Odbiornik prądu 1.

Odchył p. kąt odchyłu.

Odnowienie urządzeń (tabl.) 133.

Odpływ energii, mocy, prądu 3.

Oko śleci 4.

Oporność charakterystyczna 281.

Oporność izolacji 273.

Oporność pozorną 280; — w stanie jałowym 282, 314; — w zwarcu 282, 314; — przewodów żelaznych (tabl.) 199; — przy prądzie zmiennym 200.

Oprocentowanie kapitału 132.

Parabola; sposób wykreślenia — 24.

Pień 4.

Pobór mocy przez żarówkę 12.

Pojemność 261, 306; — własna, wzajemna i wypadkowa 261.

Połączenie równoległe i szeregowe 1.

Poprawka 72.

Potencjał własny i wzajemny 264, 306.

Prąd; — bezwzględny 182; — dwufazowy 207, 217, 234; — fazowy 209; — histerezy dielektrycznej 272; — ładowania 261, 311; — największy dopuszczalny (tabl.) 142, 143; — odbierany 10, p. obciążenie; — przełożony 78; — przewodowy 11, 209; — składowy 40, 43; — sumaryczny 79; — trójfazowy 208; — ulotu 272; — upływu przez izolację 272; — wiatowy 182; — wielofazowy 207; — wyrównawczy 40, 43, 116; — zasilania 10; — zmienny 179.

Projektowanie — p. sieć.

Promień 15.

Przekładanie obciążenia 77.

Przekrój przewodu; — gospodarczo najkorzystniejszy 120, 123; — jednostajny 89, 112; obliczanie — p. obliczanie; — najmniejszy dopuszczalny (tabl.) 146; — normalny (fabryczny) 90; sprowadzenie — do jednostajnego 32, 80; — stopniowany 91; zależność — od napięcia roboczego 127.

Przekształcanie trójkąta w gwiazdę 84.

Przenikalność magn. żelaza (tabl.) 257.

Przełączenie przewodów 298, 301, 303, 307, 309.

Przesuw p. kąt przesuwu.

Przewodność 47; — izolacji p. upływ-
ność; przyrost — 59; — właści-
wa (tabl.) 6.

Przewód 1; — dodatni 2; — dosyłowy 2,
130, 155; — gołych nagrzewanie
się 140; — gołych wytrzymałość
146; — izolowanych nagrzewanie
się 141; — izolowanych wytrzy-
małość 146; — jezdy 4, 20, 130,
155; koszt — 120, 131; objętość —
p. objętość; — obojętny 164, 209; —
odsyłowy 2, 130, 155; — napo-
wietrznych nagrzewanie się 142;
— napowietrznych wytrzymałość
146; — powrotny 207; przekrój—
p. przekrój, p. obliczanie; rozplyw
w — p. rozplyw; — skrajny 164,
207, 209; — środkowy 164; —
ujemny 2; — wspólny 207; — ze-
rowy 164, 209; — żelazny 199,
257.

Przyrost obciążenia i przewodności 59.

Punkt; — największego spadku napię-
cia 29; — obojętny 209; — od-
biorny 3, 10; — przyłożenia prą-
du 10; — spływu prądów 29; —
węzłowy 4; — zasilający 3, 5; —
zasilający dosyłowy 130, 155,
163; — zasilających liczba 150,
154, 205, 238; — zasilających liczba
gospodarczo najkorz. 156, 206,
238; — zasilający odsyłowy 130,
155, 163; — zerowy 209.

Renowacja p. odnowienie.

Rozplyw prądów 28, 49, 80; — dwufazo-
wych 217; — stałych w układzie
trójprzew. 166; — stałych w prze-
wodach zerowych 169; — trójfa-
zowych 210, 218, 241; — zmieni-
nych 179.

Równań rozwiązanie; — rachunkowe 71; —
wykreślne 56, 172.

Różnice napięć 170.

Samoi indukja 251.

Siec 4, 112, 188, 216; — elastyczna 9; —
foremna 150; — nieforemna 154; —

pierwotna 202; podział — na części
56; — prądów składowych 54,
80; — prądów wyrównawczych 54,
80; projektowanie — 150, 202, 236;
przekroje 112; — przewodów ze-
rowych 170; rozcinanie — 115; roz-
plyw prądów w — p. rozplyw; stop-
niowe upraszczanie — 77; — wtór-
na 202; zwijanie i odwijanie — 80.

Spadek napięcia 1, 5, 11, 19, 20, 23, 28, 166,
189; — dopuszczalny (dane liczbo-
we) 8, 206; — gospodarczo naj-
korzystniejszy 126; — gwiazdowe-
go 212; — międzyprzewodowego
213; — największy 29, 174, 222,
224, 230; — prądu dwufazowego
217; — prądu zmiennego 206; —
średni 23; wykres — 14.

Splecenie p. przeplecenie.

Spływ prądów 29.

Spółczynnik gospodarczy 124, 131.

Spółczynnik indukcji p. indukcyjność.

Spółczynnik linjowy 283, 314.

Spółczynnik mocy p. kąt przesuwu fazy.

Sprowadzenie do jednostajnego kąta
przesuwu fazy 186, 213.

Sprowadzenie do przekroju jednostaj-
nego 32, 80.

Stopień jednoczesności 236, 239.

Strata mocy 189, 213; — na histerezę
275; — na ulot 274.

Strata napięcia 180, 189; — od indukcyj-
ności własnej, wzajemnej i wy-
padkowej 251, 252, 297; — omowa
251; składnik bezwzględny i wato-
wy — 189.

Strata prądu; — na ładowanie 261, 311; —
na upływność 273.

Strzałki kierunkowe 3, 179, 208, 254.

Symetryczne równanie 57.

Symetryczny tor 4.

Symetryczny układ przewodów 298, 300,
302, 306, 308.

Szereg prądowy 15.

Szlak linji 4.

Światłość żarówek w zależności od na-
pięcia 8.

Temperatury przyrost 139;—dopuszczalny 142, 144.

Tor 2; — czteroprzewodowy 4; — dwuprzewodowy 4;—główny 4; — nierozgałęziony 4; — niesymetryczny 4, 19, 130, 155, 163; — okrężny 3, 28, 33;—otwarty 3; — poboczny 4; — rozgałęziony 4, 100, 101, 102, 107; rozpiływ prądów w—p. rozpiływ; — rozsyłowy 5; — symetryczny 4; — trójprzewodowy 4, 164; — wieloprzewodowy 4, 164;—wyrównawczy 116; — zamknięty 3, 112, 183;—zasilający 5, 127, 177, 202, 245.

Tramwaje i koleje elektr. 130, 155, 163.

Transfiguracja p. przekształcenie.

Transformatorów liczba gospodarczo najkorzystniejsza 205, 237.

Trasa p. szlak.

Układ: — dwufazowy nieskojarzony 207, 247, 249; — dwufazowy skojarzony 207, 217, 234, 247, 249; — dwuprzewodowy 247, 248; — gwiazdowy 209, 248, 249; — jednofazowy 210, 247, 249; — niesymetryczny p. niesymetryczny; — symetryczny p. symetryczny; — trójkątowy 208, 248, 249; — trójprzewodowy 247, 248; — wlełofazowy 207;—wlełoprzewodowy 164.

Ulot prądu 272.

Umorzenie kapitału 132.

Upływ prądu przez izolację 271.

Uplywność 271, 311;—od ulotu 272, 273; —od histerezy dielektrycznej 272, 275; — przez izolację 271, 273; — wypadkowa 272.

Upraszczenie sieci stopniowe 77.

Utrzymanie urządzeń (tabl.) 133.

Wielobok sznurowy 15.

Wielotorowa linja p. linja.

Wykres: — prądów przewodowych 16, 168; — spadków napięcia 14, 167; — wektorowy 179.

Wytrzymałość mechaniczna 145.

Wzrost napięcia 20, 167, 174, 231.

Zasilanie 3, 5, 10.

Zespół wyrównawczy 166.

Zwarcie 282.

Zwrot energii p. kierunek przepływu energii.

Zwrot prądu p. kierunek obiegu prądu.

Zwrot wektorowy prądu bezwładowego 182.

Zysk 132.

Zysk napięcia 220, 224.

Źródło prądu 1.

Żelazo; oporność — 199; przenikalność — 257.

