

ROZDZIAŁ VI.

Obliczanie na nagrzewanie i wytrzymałość.

§ 31. Nagrzewanie się przewodów.

Gdy przepuścimy przez przewód prąd elektryczny, przewód będzie się nagrzewał coraz bardziej, a po pewnym czasie dojdzie do temperatury stałej. W przewodach gołych temperatura ustala się dość szybko, w kablach zaś podziemnych po upływie kilku godzin. Z przewodów elektrycznych stale wydziela się ciepło Joule'a, które jest proporcjonalne do drugiej potęgi natężenia prądu I (w A) i do pierwszej potęgi oporności R (w Ω), a wyraża się iloczynem:

$$c' I^2 R,$$

gdzie c' jest pewnym współczynnikiem stałym. Z przewodów odpływa ciepło przez promieniowanie i udzielanie się otaczającym warstwom powietrza. Ciepło odpływające jest proporcjonalne do przyrostu temperatury ponad temperaturę otoczenia Δt^0 (w stopniach Celsjusza) i mniej więcej proporcjonalne do powierzchni przewodnika S (w cm^2), a więc wyraża się iloczynem:

$$c'' \Delta t^0 S,$$

w którym c'' jest stałym współczynnikiem liczbowym. Z chwilą ustalenia się temperatury odpływ ciepła równa się dopływowi:

$$c' I^2 R = c'' \Delta t^0 S.$$

Stąd przyrost temperatury:

$$\Delta t^0 = \left(\frac{c'}{c''} \right) \frac{I^2 R}{S}. \quad (a)$$

Najlepiej studziłyby się przewodniki płaskie. Przewodniki takie używane są tylko wyjątkowo np. do szyn zbiorczych lub do blach opornikowych. Najczęściej używane są przewodniki o przekroju kołowym, przy którym powierzchnia jest najmniejsza, a więc chłodzenie jest najmniejkorzystniejsze. Dla przekroju kołowego:

$$R = \frac{l}{k \frac{\pi d^2}{4}} \quad S = l \cdot \pi d \quad \Delta t^0 = \left(\frac{4 c'}{\pi^2 c''} \right) \frac{I^2}{k d^3}.$$

Oznaczmy przez c nowy współczynnik liczbowy:

$$c = \frac{\pi^2 c''}{4 c'},$$

a otrzymamy wzór ostateczny:

$$\Delta t^0 = \frac{I^2}{c k d^3}, \quad (b)$$

czyli

$$I^2 = c k \Delta t^0 d^3. \quad (c)$$

Równania (a), (b) i (c) opierają się na przypuszczeniu odwrotnej proporcjonalności temperatury Δt^0 do powierzchni S . Ścisłe badania wykazały, że zależność wzajemna tych wielkości jest bardziej złożona. Wzór (b) w formie ścisłej ma brzmienie następujące:

$$\Delta t^0 = \frac{I^2}{k(c_1 d^2 + c_2 d^3)}, \quad (d)$$

gdzie c_1 i c_2 są nowymi współczynnikami liczbowymi. Przyrost temperatury Δt^0 jest proporcjonalny do drugiej potęgi prądu I , a odwrotnie proporcjonalny do przewodności właściwej k i do średnicy d w potęgze pośredniej między drugą a trzecią:

$$I^2 = k \Delta t^0 (c_1 d^2 + c_2 d^3). \quad (71)$$

Gdy podstawimy do równania (71), zamiast Δt^0 , największy dopuszczalny przyrost temperatury Δt^0_{dzw} , to otrzymamy największe natężenie prądu I_{dzw} , dopuszczalne dla danego przewodu:

$$I_{dzw}^2 = k \Delta t^0_{dzw} (c_1 d^2 + c_2 d^3). \quad (e)$$

Druga potęga prądu dopuszczalnego jest proporcjonalna do przewodności właściwej k , do dopuszczalnego przyrostu temperatury Δt^0_{dzw} i do średnicy d w potęgze pośredniej między drugą a trzecią.

Co się tyczy współczynników liczbowych, to dla rozpiętych drutów gołych w temperaturze pokojowej można liczyć (przy średnicach d , wyrażonych w cm):

$$c_1 = 5,4$$

$$c_2 = 21.$$

Przewodniki izolowane mniej się nagrzewają od gołych, gdyż warstwy „izolacji elektrycznej” nie są „izolacją cieplną”, a powiększając powierzchnię chłodzenia, obniżają temperaturę przewodnika. Skutek byłby odwrotny, gdyby przewodnik był otulony „izolacją cieplną” (korkiem, termolitem i t. p.) tak, jak przewody parowe.

Wzór (71) da się zastosować do przewodników izolowanych. Zmienia się tylko współczynniki liczbowe. Dla drutów, powleczonych gumą, a rozpiętych w temperaturze pokojowej (d —średnica samej żyły) można liczyć:

$$c_1 = 13,6 \qquad c_2 = 26.$$

Nagrzewanie się podziemnych kabli obołowionych zależy od większej liczby czynników: od przewodności cieplnej warstw izolacyjnych i ziemi, od głębokości zakopania, od liczby żył i t. d. W ziemi kable nagrzewają się mniej, niż w kanałach, ale im głębiej kabel zakopany, tem wyższą osiąga temperaturę. Tak np. przyrost temperatury w kablach, zakopanych na głębokości 0,45 m, 0,75 m, 1,35 m jest w takim stosunku wzajemnym, jak liczby 100 : 104 : 115.

Dla kabli obołowionych jednożyłowych zależność między prądem roboczym I a przyrostem temperatury nagrzania Δt^0 wyraża się wzorem:

$$I^2 = k \Delta t^0 \frac{c s}{\log \frac{4 h}{d}}. \quad (72)$$

w którym c — jest współczynnikiem liczbowym, s — przekrojem żyły w mm^2 , h — głębokością zakopania w cm i d — średnicą żyły w cm . Wzór dla kabli wielożyłowych jest jeszcze bardziej złożony. Nie podajemy go na tem miejscu, nadmieniamy tylko, że ze wzoru tego między innemi wynika, iż

Druga potęga prądu roboczego (I) jest proporcjonalna do przewodności właściwej (k) i przyrostu temperatury Δt^0 .

A zatem jest to zasada zupełnie ogólna, ważna dla przewodów gołych i izolowanych (wzór 71), dla kabli jednożyłowych (wzór 72) i wielożyłowych.

Po tych wyjaśnieniach teoretycznych przechodzimy do obliczania przekroju na nagrzewanie. Zamiast tego obliczania w każdym poszczególnym przypadku, wystarczy jednorazowe ułożenie tablicy największych dopuszczalnych prądów dla wszelkich przekrojów fabrycznych. Poniżej podajemy dwie takie tablice: dla miedzianych przewodów izolowanych i dla kabli; są one ułożone przez Związek Elektrotechników Niemieckich na następujących zasadach.

Dla przewodników izolowanych (tabl. V) przyjęto za najwyższą dopuszczalną temperaturę 50^0 C. Bywały wprawdzie wypadki, że izolacja przy tej temperaturze zapalała się, ale zdarzało się to wyjątkowo i tylko wówczas, gdy temperatura ta trwała bez przerwy całe setki godzin. Co się tyczy temperatury otoczenia, to za najwyższą temperaturę

przyjęto 30° C, a więc na przyrost nagrzania się przewodu pozostawiono

$$\Delta t_{dzw}^0 = 20^{\circ} \text{ C}.$$

Biorąc rzecz ściśle, należałoby ułożyć oddzielne tablice dla przewodników słabiej izolowanych, mocniej izolowanych, dla przewodów zawieszonych na gałkach, założonych w rurkach, dla przewodów płaszczowych i t. d. Skomplikowałoby to sprawę nadmiernie. Ułożono zatem jedną wspólną tablicę dla wszelkich przewodów izolowanych, bez względu na liczbę żył, na jakość izolacji i bez względu na sposób ich założenia. Prądy obliczono dla przewodników, otoczonych jednolitą powłoką gumy wulkanizowanej, przyczem dla przekrojów od 0,5 do 10 mm² włącznie brano na uwagę przewody, założone po dwa razem w rurkach bergmanowskich, a od 16 mm² wzwyż — przewody, zawieszone pojedynczo na gałkach porcelanowych. Innemi słowy, przyjęto dla przekrojów mniejszych warunki najniekorzystniejsze, gdyż przewody w rurkach nagrzewają się bardziej, niż na gałkach.

Tablica V. *Największy prąd dopuszczalny w miedzianych przewodach izolowanych (jedno i wielożyłowych).*

Przekrój przewodnika w mm ²	Największy prąd dopuszcz. w A	Przekrój przewodnika w mm ²	Największy prąd dopuszcz. w A	Przekrój przewodnika w mm ²	Największy prąd dopuszcz. w A
0,5	7,5	16	75	185	380
0,75	9	25	100	240	450
1	11	35	125	300	525
1,5	14	50	160	400	640
2,5	20	70	200	500	760
4	25	95	240	625	880
6	31	120	280	800	1050
10	43	150	325	1000	1250

Co się tyczy przewodów gołych w budynkach, to przepisy niemieckie zalecają obciążanie ich w granicach od 4 do 50 mm² wg tablicy dla przewodów izolowanych. Przewody gołe będą się nagrzewały bardziej od izolowanych, zawieszonych na gałkach porcelanowych, ale to nagrzewanie pod względem pożarowym nie jest niebezpieczne, wobec braku łatwopalnych warstw izolacyjnych. Przewody napowietrzne znaj-

dują się jeszcze w korzystniejszych warunkach chłodzenia i dlatego mogą być obciążone prądem dwukrotnie większym, niż przewody izolowane w budynkach (tabl. V).

Dla podziemnych kabli obołowionych (tabl. VI), ze względu na brak niebezpieczeństwa ogniowego, dopuszczamy większy przyrost tem-

Tablica VI. *Największy prąd dopuszczalny w miedzianych kablach obołowionych, zakopanych w ziemi pojedynczo lub po dwa razem.*

Przekrój żyły w mm ²	Kable 1-żyłowe	Kable 2-żyłowe		Kable 3-żyłowe				Kable 4-żyłowe	
	do 750 V	do 3 000 V	do 10 000 V	do 3 000 V	do 10 000 V	do 15 000 V	do 25 000 V	do 3 000 V	do 10 000 V
Największy prąd dopuszczalny w A									
1	24	19	—	17	—	—	—	16	—
1,5	31	25	—	22	—	—	—	20	—
2,5	41	33	—	29	—	—	—	26	—
4	55	42	—	37	—	—	—	34	—
6	70	53	—	47	—	—	—	43	—
10	95	70	65	65	60	—	—	57	55
16	130	95	90	85	80	—	—	75	70
25	170	125	115	110	105	100	—	100	95
35	210	150	140	135	125	120	110	120	115
50	230	190	175	165	155	145	135	150	140
70	320	230	215	200	190	180	165	185	170
95	385	275	255	240	225	215	200	220	205
120	450	315	290	280	260	250	235	250	240
150	510	360	335	315	300	285	265	290	275
185	575	405	380	360	340	325	300	330	310
240	670	470	—	420	—	—	—	385	—
300	760	530	—	475	—	—	—	430	—
400	910	635	—	570	—	—	—	—	—
500	1035	—	—	—	—	—	—	—	—
625	1190	—	—	—	—	—	—	—	—
800	1380	—	—	—	—	—	—	—	—
1000	1585	—	—	—	—	—	—	—	—

peratury nagrzania, niż dla przewodów izolowanych, mianowicie:

$$\Delta t_{dzw}^0 = 25^{\circ} \text{ C.}$$

Przy układaniu tablicy liczone poatem, że kable będą zakopane na głębokości:

$$h = 70 \text{ cm}$$

po dwa, jeden obok drugiego. W warunkach mniej sprzyjających chłodzeniu, a więc przy większej liczbie kabli lub przy zawieszeniu kabla w budynkach, kanałach czy chodnikach kopalnianych, należy zmniejszyć liczby amperów z tabl. VI o 25%.

Jak widać z tabl. VI, im więcej kabel ma żył i im do wyższego napięcia jest przeznaczony, tem mniejsze znosi obciążenie.

Tabl. V i VI ułożone są dla miedzi, dla przekrojów fabrycznych i dla warunków normalnych. Opierając się na tych tabelach i na zasadach teoretycznych, wyłuszczonych wyżej (wzory 71, 72), można z łatwością obliczyć największy prąd dopuszczalny dla różnych metali i dla dowolnych warunków.

Przykład 32. Obliczyć największy prąd dopuszczalny dla izolowanej linki żelaznej o przekroju 80 mm^2 (średnica żyły ... 11,3 mm) z warunkiem, aby przyrost temperatury nie przekraczał 15° C. Przewodność materiału ... $7,3 \frac{m}{\Omega \text{ mm}^2}$.

Wg tablicy V przewodnik izolowany miedziany $\left(k = 57,8 \frac{m}{\Omega \text{ mm}^2}\right)$ o przekroju 70 mm^2 ($d = 1,05 \text{ cm}$) może być obciążony prądem 200 A, a o przekroju 95 mm^2 ($d = 1,25 \text{ cm}$) ... 240 A, nie przekraczając nagrzania 20° C. Wg wzoru (71):

$$200^2 = 57,8 \cdot 20 (c_1 1,05^2 + c_2 1,05^3)$$

$$240^2 = 57,8 \cdot 20 (c_1 1,25^2 + c_2 1,25^3).$$

Z równań tych znajdujemy współczynniki liczbowe:

$$c_1 = 28,8 \quad c_2 = 2,5.$$

Prąd dopuszczalny dla przewodnika żelaznego znaleźmy ze wzoru (71):

$$(I_{dzw})^2 = 7,3 \cdot 15 (28,8 \cdot 1,13^2 + 2,5 \cdot 1,13^3),$$

stąd

$$I_{dzw} = 67 \text{ A.}$$

Przykład 33. Obliczyć największy prąd dopuszczalny dla jednożyłowego kabla cynkowego $\left(k = 16 \frac{m}{\Omega \text{ mm}^2}\right)$ o przekroju 80 mm^2 ($d = 1,13 \text{ cm}$), zakopanego na głębokość 100 cm., z warunkiem, aby przyrost temperatury nie przekraczał 20° C.

Wg tabl. VI kabel jednożyłowy miedziany ($k = 57,8 \frac{m}{\Omega mm^2}$) o przekroju $70 mm^2$ ($d = 1,05 cm$), zakopany na głębokości $70 cm$, może być obciążony prądem $320 A$, nie przekraczając $25^\circ C$ nagrzania. Wg wzoru (72):

$$320^2 = 57,8 \cdot 25 \frac{c \cdot 70}{\log \frac{4 \cdot 70}{1,05}}$$

Tablica VII. Średnica drutów i linek.

Przekrój w mm^2	Średnica		Przekrój w mm^2	Średnica linki w mm	Przekrój w mm^2	Średnica linki w mm
	drutu w mm	linki w mm				
1	1,13	1,3	35	7,5	300	22,5
1,5	1,38	1,6	50	9,0	400	26,3
2,5	1,79	2,1	70	10,5	500	29,4
4	2,26	2,6	95	12,5	625	32,9
6	2,77	3,2	120	14	800	37,2
10	3,57	4,1	150	15,8	1000	41,5
16	4,52	5,1	185	17,5		
25	5,65	6,3	240	20,3		

Stąd znajdujemy spólczynnik liczbowy:

$$c = 2,456.$$

Prąd dopuszczalny dla kabla cynkowego znajdziemy ze wzoru (72):

$$\left(I_{dew}\right)^2 = 16 \cdot 20 \cdot \frac{2,456 \cdot 80}{\log \frac{4 \cdot 100}{1,13}} \quad I_{dew} = 157 A.$$

Przykład 34. Obliczyć największy prąd dopuszczalny dla trójżyłowego kabla glinowego ($k = 34,5 \frac{m}{\Omega mm^2}$) do $3000 V$ o przekroju $3 \cdot 25 mm^2$ z warunkiem, aby przyrost temperatury nie przekraczał $20^\circ C$.

Wg tabl. VI dla kabla miedzianego przy $25^\circ C$ jest dopuszczalny prąd $110 A$. Dla kabla miedzianego przy $20^\circ C$ wypadnie prąd:

$$(I_{20 Cu})^2 : 110^2 = 20 : 25 \quad I_{20 Cu} = 98,4 A,$$

a dla kabla glinowego przy $20^\circ C$...

$$(I_{20 Al})^2 : 98,4^2 = 34,5 : 57,8 \quad I_{20 Al} = 76 A.$$

§ 32. Wytrzymałość mechaniczna.

Przy wyznaczaniu przekroju trzeba się jeszcze liczyć z wytrzymałością mechaniczną przewodnika. Pęknięcie przewodnika grozi nie tylko przerwą ruchu, niebezpieczeństwem dla życia ludzkiego, ale i niebezpieczeństwem pożarowym. Zbyt cienki przewód, nadpękując, może się nagrzać nadmiernie wskutek zmniejszonego przekroju, zapalić

izolację i spowodować pożar. Również może powstać pożar wskutek utworzenia się łuku w miejscu pęknięcia przewodnika.

Szczególnie narażone są na pękanie przewody napowietrzne. Jakkolwiek przy wyprężaniu przewodów liczymy się z warunkami atmosferycznymi: z mrozem, wiatrem, sadią i jakkolwiek linki naciągamy z 2,5-krotnym bezpieczeństwem, a druty nawet z 4-krotnym, to jednak zdarzają się obciążenia dorywcze, które przekraczają granice przewidywania.

O ścisłym obliczaniu przekroju przewodnika na wytrzymałość mechaniczną nie może być mowy. Można tylko, opierając się na dotychczasowym doświadczeniu, podać najmniejsze przekroje dopuszczalne dla rozmaitych rodzajów instalacji (tabl. VIII).

Tablica VIII. *Najmniejszy przekrój dopuszczalny ze względu na wytrzymałość mechaniczną.*

Rodzaj instalacji	Przewodniki miedziane	Przewodniki nlemiedziane
	Najmniejszy przekrój w mm ²	
Przewodniki świecznikowe (wewnątrz świeczników lub na świecznikach), założone		
{ w budynkach	0,5	Al. 1
{ w podziemiach kopalnianych	1	
Przewodniki zwieszakowe (dwużyłowe z linką wieszakową do zawieszania lamp)		
{ w budynkach	0,75	
{ w podziemiach kopalnianych	1	
Wszelkie przewodniki izolowane, jedno lub wielożyłowe, stałe lub przenośne, założone w rurkach lub zawieszone na gałkach w odstępach nie większych od 1 m		
{ w budynkach	1	Al. 1; Zn. 1,5; Fe. 2,5
{ w podziemiach kopalnianych	2,5	
Przewodniki, jak wyżej, lecz zawieszone na gałkach w odstępach większych od 1 m w budynkach	4	Al. 6
Przewodniki gołe w rurkach	1,5	
Przewodniki gołe, { w pracowniach elektrycznych	16	
doziemne { w innych pomieszczeniach	4	
Przewodniki, zawieszone zewnątrz budynków przy rozpiętościach do 20 m	4	Al. 6
Przewody niskiego napięcia, zawieszone zewnątrz budynków przy rozpiętościach do 35 m (sieci miejskie).	6	Al. 16
Przewody napowietrzne	10	Al. 25

§ 33. Przebieg obliczania przekroju.

Aby wyznaczyć przekrój przewodnika, należy obliczyć go: 1) na spadek napięcia (jeżeli są pod tym względem jakie ograniczenia), 2) na gospodarność, 3) na nagrzewanie, 4) na wytrzymałość mechaniczną i wybrać z liczb znalezionych przekrój największy.

Przykład 35. Zaprojektować linię napowietrzną, któraby doprowadzała prąd 220 V do oświetlenia budynku, odległego od elektrowni o 500 m. Największy pobór prądu ... 5 A. Dopuszczalny spadek napięcia 3%. Spółczynniki gospodarcze: $n_e=0,6$; $n_p=0,4$. Przewodniki miedziane $\left(k=57 \frac{m}{\Omega mm^2}\right)$.

$$I_{\max}=5 \text{ A} \quad l=500 \text{ m} \quad \Delta E_{\max}=0,03 \cdot 220=6,6 \text{ V} \quad n_e=0,6 \quad n_p=0,4.$$

1. Obliczenie na spadek napięcia:

$$s_1 = \frac{2 \cdot 5 \cdot 500}{57 \cdot 6,6} = 13,4 \approx 16 \text{ mm}^2.$$

2. Obliczenie na gospodarność:

$$s_2 = 5 \cdot \frac{0,6}{0,4} = 7,5 \approx 10 \text{ mm}^2.$$

3. Obliczenie na nagrzewanie; wg tabl. V nawet dla przewodu izolowanego wewnątrz budynku wystarczyłyby przekrój:

$$s_3 = 0,5 \text{ mm}^2.$$

4. Obliczenie na wytrzymałość; dla przewodów niskiego napięcia przy rozpiętościach do 35 m wystarczy (tabl. VIII):

$$s_4 = 6 \text{ mm}^2.$$

Decyduje w tym przypadku spadek napięcia:

$$s = 16 \text{ mm}^2.$$

Przykład 36 (patrz przykład 29). Zaprojektować linię elektryczną na prąd 100-amperowy w dwóch alternatywach: A) linia napowietrzna i B) kablowa, któraby doprowadzała prąd wyłącznie do pędzenia silników. Spółczynniki gospodarcze: $n_e=0,586$, $n_p=0,404$ dla linii napowietrznej i $n_p=0,442$ dla kabli.

A. Linia napowietrzna.

1. Obliczenie na spadek napięcia – zbyteczne (same silniki!).
2. Obliczenie na gospodarność:

$$s_2 = 100 \cdot \frac{0,586}{0,404} = 143 \approx 2 \cdot 70 \text{ mm}^2.$$

Zamiast 150 mm² projektujemy linię dwutorową 2 × 70 mm² dla łatwiejszego montażu.

3. Obliczenie na nagrzewanie. Licząc prąd dopuszczalny dwa razy większy od prądów w tabl. V, wyznaczamy:

$$s_3 = 16 \text{ mm}^2.$$

4. Obliczenie na wytrzymałość. Dla linii napowietrznej bez żadnych ograniczeń co do rozpiętości wystarczy:

$$s_4 = 10 \text{ mm}^2.$$

Decyduje gospodarność:

$$s = 2.70 \text{ mm}^2.$$

B. Linja kablowa:

1. Obliczenie na spadek napięcia — zbyteczne.

2. Obliczenie na gospodarność:

$$s_2 = 100 \cdot \frac{0,586}{0,442} = 132 \approx 120 \text{ mm}^2.$$

3. Obliczenie na nagrzewanie. Dla pojedynczych kabli do 750 V przy 100 amperach wystarczy przekrój (tabl. VI):

$$s_3 = 16 \text{ mm}^2.$$

4. Obliczenie na wytrzymałość — dla kabli zbyteczne.

Decyduje gospodarność:

$$s = 120 \text{ mm}^2.$$

Przykład 37. Dla połączenia rozrusznika z asynchronicznym silnikiem pierścieniowym projektuje się założenie trójżyłowego kabla opancerzonego. Napięcie przy pierścieniach ... 100 V. Największy prąd w rozruszniku ... 80 A. Obliczyć przekrój.

1. Obliczenie na spadek napięcia — zbyteczne.

2. Obliczenie na gospodarność — zbyteczne.

3. Obliczenie na nagrzewanie. Dla kabli, niezakopanych w ziemi, należy zmniejszyć liczby amperów w tabl. VI o 25%. Dla przekroju:

$$s_3 = 25 \text{ mm}^2$$

dopuszczalny prąd wyniesie, zamiast 110 A, ... 82,5 A.

4. Obliczenie na wytrzymałość — dla kabli zbyteczne.

Decyduje nagrzewanie:

$$s = 25 \text{ mm}^2.$$

Przykład 38. Z punktu zasilającego o napięciu 440 V odchodzi pojedynczy przewód okrągły o długości 2000 m z szeregiem lamp łukowych po 40 V i 8 A. Pożądana jest jak największa liczba lamp. Przewody napowietrzne. Obliczyć przekrój.

Spokojne palenie się lamp łukowych wymaga w obwodzie oporu uspokajającego, któryby niweczył przynajmniej 15% napięcia roboczego:

$$0,15 \cdot 440 = 66 \text{ V}.$$

Dla lamp pozostanie:

$$440 - 66 = 374 \text{ V}.$$

Stąd największa liczba lamp:

$$\frac{374}{40} = 9,35 \approx 9 \text{ sztuk.}$$

Lampy pochłoną:

$$40 \cdot 9 = 360 \text{ V},$$

a dopuszczalny spadek napięcia w przewodach wyniesie:

$$\Delta E_{dzw} = 440 - 360 = 80 \text{ V}.$$

1. Obliczenie na spadek napięcia:

$$s_1 = \frac{8 \cdot 2000}{57 \cdot 80} = 3,5 \approx 4 \text{ mm}^2.$$

2. Obliczenie na gospodarność — nie wchodzi w rachubę.

3. Obliczenie na nagrzewanie. Lampy zużywają normalnie 8 A. Wystarczyłby przekrój:

$$s_3 = 0,5 \text{ mm}^2.$$

4. Obliczenie na wytrzymałość. Dla linii napowietrznej bez żadnych ograniczeń co do rozpiętości wystarcza:

$$s_4 = 10 \text{ mm}^2.$$

Decyduje wytrzymałość:

$$s = 10 \text{ mm}^2.$$

Cała oporność przewodu wyniesie:

$$\frac{2000}{57 \cdot 10} = 3,5 \Omega,$$

a ponieważ w obwodzie musi być zniweczone 80 V, przeto trzeba będzie wprowadzić do obwodu opornik dodatkowy o oporności:

$$\frac{80}{8} - 3,5 = 6,5 \Omega.$$

Rys. 102 daje przykład sieci foremnej, złożonej z kwadratów; punkty zasilające są rozstawione po przekątnych i zajmują co drugi punkt węzłowy. Sfera działania jednego punktu zasilającego a jest okolona liniami przerywanymi $b c d e$. Jak widać z rysunku, sfera ta obejmuje 16 boków, a więc w naszym przykładzie

$$\nu = 16.$$

Z każdego punktu zasilającego odchodzą cztery gałęzie krzyżowe (na rys. jedna z gałęzi jest oznaczona liniami grubemi), niezależne pod względem rozplywu prądów jedna od drugiej. Do każdej gałęzi wpływa z punktu zasilającego prąd $4i$, do następnego punktu węzłowego dopływa prąd $3i$ i rozchodzi się w trzech kierunkach. Obliczmy największy spadek napięcia w tej sieci (np. od punktu a do d):

$$\Delta E_{\max} = \frac{2}{k s_2} (4i \cdot 2l_2 - i \cdot 1,5l_2 - 2i \cdot l_2 - i \cdot 0,5l_2) = 8 \frac{i l_2}{k s_2} = \Delta E_{dzu},$$

stąd otrzymujemy:

$$s_2 = 8 \frac{i l_2}{k \Delta E_{dzu}}.$$

Spółczynnik liczbowy α w naszym przykładzie wynosi:

$$\alpha = 8.$$

Wreszcie obliczmy obszar powierzchni sieci, przypadający na jeden bok (na rys. — powierzchnia zacieniowana):

$$\left(\frac{l_2}{\sqrt{2}} \right)^2 = 0,5 l_2^2,$$

a więc dla naszego przykładu współczynnik liczbowy:

$$\beta = 0,5.$$

W podobny sposób obliczono współczynniki liczbowe: ν , α i β dla rozmaitych sieci foremnych, złożonych z kwadratów (rys. 103), trójkątów (rys. 104) i sześciokątów (rys. 105), a osiągnięte wyniki zestawiono w tablicy IX.

Zmierzamy do wyprowadzenia ogólnego wzoru dla wszelkich sieci foremnych i w tym celu wprowadzamy jeszcze następujące oznaczenia:

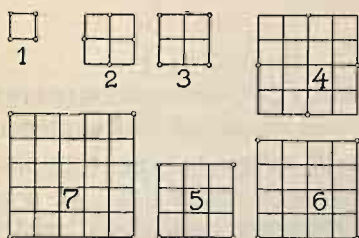
E — średnie napięcie robocze w V ;

P — całkowita moc, odbierana z sieci, w W ;

N — liczba punktów zasilających;

S — obszar całej sieci rozsyłowej w m^2 ;
 Σl_2 — suma długości wszystkich boków w m ;
 n — liczba boków sieci.

Z samego określenia tych wielkości wynika, że



Rys. 103.

$$n = N \nu \quad (b)$$

$$P = (n i) E = N \nu i E \quad (c)$$

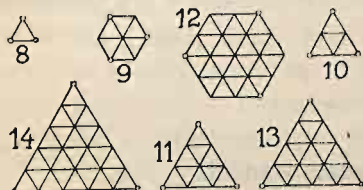
$$S = n (\beta l_2^2) = N \nu \beta l_2^2 \quad (d)$$

$$\Sigma l_2 = n l_2 = N \nu l_2. \quad (e)$$

Wróćmy do wzoru (a) i pomnóżmy licznik i mianownik tego wzoru przez następujący iloczyn:

$$E N^2 \nu^2 \beta l_2 (\Sigma l_2)^{0,25},$$

a otrzymamy:

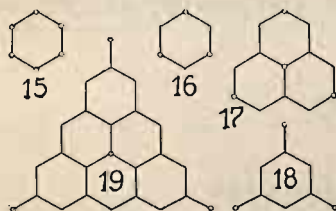


Rys. 104.

$$s_2 = \alpha \frac{i l_2}{k \Delta E_{dzw}} =$$

$$= \frac{\alpha i l_2 E N^2 \nu^2 \beta l_2 (\Sigma l_2)^{0,25}}{k \Delta E_{dzw} E N^2 \nu^2 \beta l_2 (\Sigma l_2)^{0,25}} = \left(\frac{\alpha}{\nu^{1,25} \beta} \right) \times$$

$$\times \frac{(N \nu i E) (N \nu \beta l_2^2) (\Sigma l_2)^{0,25}}{k \Delta E_{dzw} E N^{1,25} (N \nu l_2)^{0,75} (\Sigma l_2)^{0,25} l_2},$$



Rys. 105.

$$s_2 = \frac{\alpha}{\nu^{1,25} \beta} \cdot \frac{P \cdot S}{k \Delta E_{dzw} E (\Sigma l_2)} \sqrt[4]{\frac{n}{N^5}}. \quad (f)$$

Spółczynnik liczbowy $\frac{\alpha}{\nu^{1,25} \beta}$ obli-

czono dla rozmaitych sieci foremnych (rys. 103, 104, 105), a otrzymane wyniki zestawiono w tabl. IX. Rozpatr-

my się w tych liczbach. Pięć liczb (na tabl. wziętych w nawias) różni się znacznie od pozostałych. Liczby te dotyczą sieci najprostszych, w których nie ma żadnego rozgałęzienia prądu, a punkty zasilające są rozstawione bądź po wszystkich punktach węzłowych (sieci oznaczone № № 1, 8, 15), bądź co drugi punkt (2, 16). Ponieważ wyprowadzamy wzór dla sieci normalnych, z rozgałęzieniami prądu, przeto możemy nie brać na uwagę tych pięciu liczb.

Tablica IX. Spółczynniki liczbowe sieci foremnych.

Odstępy między punktami zasilającymi		l_2		1,41 l_2		1,73 l_2		2 l_2		2,83 l_2		3 l_2		3,46 l_2		4 l_2		5 l_2			
Sieć złożona:	β	ν	α	ν	α	ν	α	ν	α	ν	α	ν	α	ν	α	ν	α	ν	α		
z kwadratów	0,5	2	0,25	4	1,00	—	—	8	4,00	16	8,00	18	10,25	—	—	32	21,33	50	36,25		
	0,289	3	0,25	—	—	9	2,25	12	3,25	—	—	27	9,00	36	12,96	48	18,25	75	31,87		
sześciokątów	0,866	1,5	0,25	—	—	3	1,00	6	3,25	—	—	—	—	12	10,00	24	27,25	—	—		
Spółczynnik $\frac{\alpha}{\nu^{1,25} \beta}$																					
z kwadratów . . .	1 (0,210)	2 (0,354)	3	—	4	0,595	5	0,553	6	0,561	7	0,545	8	0,509	9	0,500	10	0,500	11	0,500	
	12 (0,219)	13	0,500	14	0,504	15	0,504	16	0,506	17	0,506	18	0,506	19	0,509	20	0,500	21	0,500	22	0,500
trójkątów . . .	23 (0,174)	24	—	25	—	26	—	27	—	28	—	29	—	30	—	31	—	32	—	33	—
sześciokątów . . .	34 (0,174)	35	—	36	—	37	—	38	—	39	—	40	—	41	—	42	—	43	—	44	—

Wszystkie liczby pozostałe (w tabl. oznaczone drukiem grubym) tak niewiele różnią się od siebie, że możemy uznać współczynnik ten za liczbę stałą i równą:

$$\frac{\alpha}{\nu^{1,25} \beta} = 0,52. \quad (g)$$

Tak więc, w sieciach foremnych przekrój przewodnika możemy obliczyć wg przybliżonego wzoru:

$$s_2 = 0,52 \frac{P S}{k E \Delta E_{dzw} (\Sigma l_2)} \sqrt[4]{\frac{n}{N^5}}, \quad (73)$$

albo odwrotnie, znając przekrój, możemy obliczyć liczbę punktów zasilających:

$$N = \sqrt[5]{\left(\frac{0,52 P S}{k s_2 E \Delta E_{dzw} (\Sigma l_2)} \right)^4 \cdot n}. \quad (74)$$

§ 35. Sieci nieforemne.

Wzory, wyprowadzone dla sieci foremnych, możemy rozszerzyć i na sieci nieforemne. Trzeba jednak zwrócić uwagę na okoliczności, które w sieciach nieforemnych wpływają niekorzystnie na wielkość przekroju przewodów. W sieciach foremnych we wszystkich punktach spływu spadek napięcia osiąga maximum. Tu zaś, wobec różnorodnych kształtów sieci, można osiągnąć największy spadek napięcia w jednym lub najwyżej w kilku punktach spływu, ale nigdy we wszystkich. Niecałkowite wyzyskanie dopuszczalnego spadku napięcia powoduje powiększenie przekroju. Nierównomierne rozłożenie obciążenia wpływa również na powiększenie przekroju. To też we wzorze (73) z chwilą uogólnienia go do wszelkich sieci nieforemnych wypada powiększyć współczynnik liczbowy. Drogą ścisłego obliczenia przekroju w różnorodnych sieciach miejskich ustalono, że współczynnik ten waha się około 0,75.

Jednostajny przekrój dla sieci nieforemnej, a w razie stosowania przekrojów różnorodnych — przekrój średni, obliczymy wg przybliżonego wzoru:

$$s_2 = 0,75 \frac{P S}{k E \Delta E_{dzw} (\Sigma l_2)} \sqrt[4]{\frac{n}{N^5}} \quad (75)$$

albo, odwracając ten wzór, znajdziemy liczbę punktów zasilających:

$$N = \sqrt[5]{\left(\frac{0,75 P S}{k s_2 E \Delta E_{dzw} (\Sigma l_2)} \right)^4 \cdot n}. \quad (76)$$

Przykład 39. Rys. 106 przedstawia plan sieci rozsyłowej miasta prowincjonalnego. Napięcie... 440 V, największe obciążenie... 350 kW, największy dopuszczalny spadek napięcia... 3%. Obliczyć liczbę punktów zasilających w pięciu alternatywach, przy zastosowaniu przewodów miedzianych o przekroju jednostajnym:

- 1) 10 mm²; 2) 16 mm²;
3) 25 mm²; 4) 35 mm²; 5) 50 mm².

Obszar sieci (na rys. obwiedziony liniami przerywanymi):

$$S = 2023 \frac{1124 + 483}{2} + \\ + 1316 \cdot 546 = 2334\,000 \text{ m}^2.$$

Liczba boków (na rys. ponumerowanych) ... $n = 52$.
Długość wszystkich boków
 $\Sigma l_2 = 15\,550 \text{ m}$.

$$P = 350\,000 \text{ W}; \quad E = 440 \text{ V}; \quad \Delta E_{dzw} = 0,03 \cdot 440 = 13,2 \text{ V}; \quad k = 57 \frac{\text{m}}{\Omega \text{ mm}^2};$$

$$S = 2\,334\,000 \text{ m}^2; \quad \Sigma l_2 = 15\,550 \text{ m}; \quad n = 52.$$

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

$$N = \sqrt[5]{\left(\frac{0,75 \cdot 350\,000 \cdot 2\,334\,000}{57 \cdot 10 \cdot 440 \cdot 13,2 \cdot 15\,550} \right)^4 \cdot 52} = 16;$$

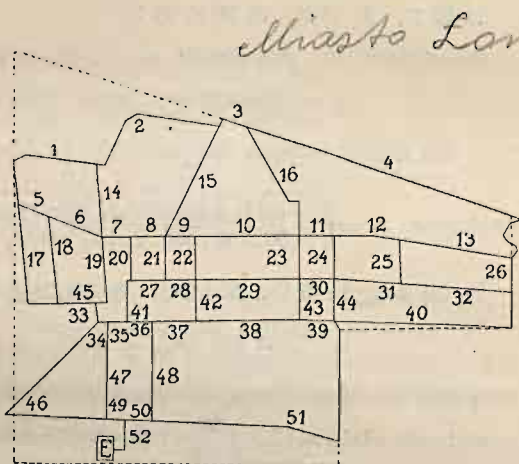
- 2) Dla $s_2 = 16 \text{ mm}^2$ $N = 10,9 \approx 11$; 3) dla $s_2 = 25 \text{ mm}^2$ $N = 7,6 \approx 8$;

- 4) dla $s_2 = 35 \text{ mm}^2$ $N = 5,8 \approx 6$; 5) dla $s_2 = 50 \text{ mm}^2$ $N = 4,4 \approx 5$.

W sieciach niesymetrycznych np. w sieciach kolei elektrycznych (patrz § 28) obliczamy oddzielnie przekroje i liczbę punktów zasilających dla sieci dosyłowej, a oddzielnie dla odsyłowej. Wzory (75) i (76) pozostaną w mocy z tą tylko zmianą, że, zamiast spadku dwuprzewodowego ΔE_{dzw} , wejdzie do wzorów podwojony spadek jedнопrzewodowy $2 \Delta e_{dzw}$:

$$s_2 = 0,75 \frac{P S}{k E 2 \Delta e_{dzw} (\Sigma l_2)} \sqrt[4]{\frac{n}{N^5}} \quad (77); \quad N = \sqrt[5]{\left(\frac{0,75 P S}{k s_2 E 2 \Delta e_{dzw} (\Sigma l_2)} \right)^4 n}. \quad (78)$$

Przykład 40. Projektuje się tramwajową sieć przewodów jezdnych. Sieć dwutorowa z przewodnika brązowego o przewodności 56 i przekroju 65 mm². Największe obciążenie... 6318 kW, napięcie ... 600 V, obszar sieci 37265625 m², liczba boków 97, długość wszystkich boków (czyli długość torów) ... 76963 m.



Rys. 106.

Obliczyć liczbę dosyłowych punktów zasilających w czterech alternatywach, gdy największy spadek napięcia w przewodach jezdnym Δe_{dzw} wyniesie:

1) 10 V, 2) 15 V, 3) 20 V, 4) 25 V.

$$P = 6\,318\,000 \text{ W}; \quad E = 600 \text{ V}; \quad s_2 = 2.65 = 130 \text{ mm}^2; \quad k = 56 \frac{\text{m}}{\Omega \text{ mm}^2};$$

$$S = 37\,265\,625 \text{ m}^2; \quad \Sigma l_2 = 76\,963 \text{ m}; \quad n = 97.$$

1) Dla spadku napięcia $\Delta e_{dzw} = 10 \text{ V}$:

$$N = \sqrt[5]{\left(\frac{0.75 \cdot 6\,318\,000 \cdot 37\,265\,625}{56 \cdot 130 \cdot 600 \cdot 2 \cdot 10 \cdot 76\,963} \right)^4 \cdot 97} = 33.6 \approx 34;$$

2) dla $\Delta e_{dzw} = 15 \text{ V} \dots N = 24$; 3) dla $\Delta e_{dzw} = 20 \text{ V} \dots N = 19$;

4) dla $\Delta e_{dzw} = 25 \text{ V} \dots N = 16$.

Przykład 41. Do powyższej sieci tramwajowej mają być zastosowane szyny stalowe o przewodności właściwej $5.5 \frac{\text{m}}{\Omega \text{ mm}^2}$ i przekroju $6\,500 \text{ mm}^2$. Największy dopuszczalny spadek napięcia w szynach $\Delta e_{dzw} = 1.25 \text{ V}$. Obliczyć liczbę dosyłowych punktów zasilających.

$$P = 6\,318\,000 \text{ W}; \quad E = 600 \text{ V}; \quad \Delta e_{dzw} = 1.25 \text{ V}; \quad s_2 = 4 \cdot 6\,500 = 26\,000 \text{ mm}^2;$$

$$k = 5.5 \frac{\text{m}}{\Omega \text{ mm}^2}; \quad S = 37\,265\,625 \text{ m}^2; \quad \Sigma l_2 = 76\,963 \text{ m}; \quad n = 97.$$

$$N = \sqrt[5]{\left(\frac{0.75 \cdot 6\,318\,000 \cdot 37\,265\,625}{5.5 \cdot 26\,000 \cdot 600 \cdot 2 \cdot 1.25 \cdot 76\,963} \right)^4 \cdot 97} = 17.2 \approx 17.$$

§ 36. Liczba punktów zasilających gospodarczo najkorzystniejsza.

Chcąc obliczyć liczbę punktów zasilających, musimy mieć wyznaczony spadek napięcia i ustalony przekrój przewodów rozsyłowych. Zdarza się niekiedy, że obie te wielkości są zgóry narzucone projektującemu w postaci przepisów technicznych lub praktycznych i wówczas (jak w przykładzie 41) ustalenie liczby punktów zasilających nie przedstawia trudności. Zwykle jednak mamy narzuconą tylko jedną z tych wielkości: największy dopuszczalny spadek napięcia (w przykładzie 39) lub przekrój przewodów (przykład 40), a wielkość drugą wraz z liczbą punktów zasilających musimy tak ustalić, aby koszty przesyłania prądu były jaknajmniejsze. Innymi słowy, obliczamy liczbę punktów zasilających gospodarczo najkorzystniejszą.

Wracamy do obliczania na gospodarność. Poprzednio ustaliliśmy koszty przesyłania prądu za pośrednictwem jednego (§ 26) lub kilku torów zasilających (§ 28), obecnie będziemy obliczali koszty przesyłania prądu przez tory zasilające i sieć rozsyłową razem.

Ułożmy kosztorys całej instalacji przewodowej. Zaczniemy od torów zasilających. Koszt tych torów wyniesie (p. wzór „c” w § 26):

$$F_{p1} = N \{ 2 l_1 (a_1 s_1 + c_1) + C_1 \}, \quad (a)$$

przyczem N jest liczbą punktów i torów zasilających;

l_1 — średnią długością jednego toru w m ;

s_1 — średnim przekrojem w mm^2 ;

a_1, c_1 — współczynnikami kosztu przewodu wraz z przyborami i montażem;

C_1 — kosztem przyłączenia jednego toru zasilającego na obu krańcach wraz z urządzeniem punktu zasilającego (na słupie, w budce lub w studzience podziemnej) z przyrządami rozdzielczymi, ochronnymi i pomiarowymi.

Koszt sieci rozsyłowej wyrazi się wzorem:

$$F_{p2} = 2 (\Sigma l_2) (a_2 s_2 + c_2), \quad (b)$$

w którym (Σl_2) jest sumą długości wszystkich boków sieci w m ;

s_2 — jednostajnym lub średnim przekrojem w mm^2 ;

a_2, c_2 — współczynnikami kosztu torów rozsyłowych wraz z przyborami i montażem.

Tak więc, cały koszt zakładowy sieci zasilającej i rozsyłowej razem wynosi:

$$F_p = F_{p1} + F_{p2} = N \{ 2 l_1 (a_1 s_1 + c_1) + C_1 \} + 2 (\Sigma l_2) (a_2 s_2 + c_2),$$

czyli

$$F_p = \underbrace{a_1 (2 N l_1 s_1)}_{(1)} + \underbrace{c_1 (2 N l_1)}_{(2)} + \underbrace{N C_1}_{(3)} + \underbrace{a_2 [2 (\Sigma l_2) s_2]}_{(4)} + \underbrace{2 (\Sigma l_2) c_2}_{(5)}. \quad (c)$$

Koszta F_p składają się z pięciu pozycji. Rozpatrzmy je każdą osobno i sprawdźmy ich zależność od liczby punktów zasilających N .

1) Pozycja $a_1 (2 N l_1 s_1)$ jest iloczynem współczynnika a_1 przez objętość miedzi we wszystkich torach zasilających V_1 :

$$V_1 = 2 N l_1 s_1,$$

a zatem jest to do pewnego stopnia „koszt miedzi w torach zasilających”. Można dowieść, że objętość miedzi V_1 zupełnie nie zależy od liczby punktów zasilających. Oznaczmy przez

I_{\max} — sumę prądów, płynących przez wszystkie tory zasilające,

ΔE_1 — największy dopuszczalny spadek napięcia w tych torach,

otrzymamy średnią wartość prądu w jednym torze zasilającym:

$$\frac{I_{\max}}{N},$$

średni przekrój:

$$s_1 = \frac{2 \cdot \left(\frac{I_{\max}}{N} \right) l_1}{k \Delta E_1},$$

a objętość miedzi we wszystkich torach zasilających:

$$V_1 = 2 N l_1 s_1 = \frac{4 I_{\max} l_1^2}{k \Delta E_1}.$$

A więc, objętość V_1 nie zależy od liczby N . Przez zwiększenie liczby punktów zasilających powiększa się długość wszystkich torów, ale jednocześnie zmniejsza się ich przekrój tak, że objętość pozostaje bez zmiany. Pierwsza pozycja kosztorysowa nie zależy od liczby punktów.

2) Pozycja $c_1 (2 N l_1)$ jest iloczynem współczynnika c_1 przez długość wszystkich torów zasilających. Jest to jakby „koszt przyborów (słupów, izolatorów, a w kablach — odzieży) i koszt montażu torów zasilających”. Średnią długość toru zasilającego l_1 możemy uważać za wielkość stałą, a całą drugą pozycję kosztorysową — za proporcjonalną do liczby punktów zasilających.

3) Pozycja $N C_1$, czyli koszt przyłączenia torów na obu krańcach wraz z kosztem urządzeń punktów zasilających, jest z natury rzeczy proporcjonalna do liczby punktów zasilających.

4) Pozycja $a_2 [2 (\Sigma l_2) s_2]$ jest poniekąd „kosztem miedzi w torach rozsyłowych”. Gdy przekrój s_2 jest zgóry przepisany, wówczas koszt ten jest wielkością stałą. Najczęściej jednak przekrój s_2 zależy od dopuszczalnego spadku napięcia ΔE_2 i jest tem większy, im mniejsza jest liczba punktów N . Opierając się na wzorze empirycznym (75), powiemy, że przekrój jest odwrotnie proporcjonalny do liczby punktów zasilających w potęgę $5/4$. Stąd wnioskujemy, że koszt miedzi w torach rozsyłowych jest również odwrotnie proporcjonalny do liczby punktów zasilających w potęgę $5/4$.

5) Ostatnia wreszcie pozycja $2 (\Sigma l_2) c_2$ — „koszt przyborów i montażu torów rozsyłowych” — jest wielkością stałą, niezależną od liczby punktów zasilających.

Przechodzimy do kosztów zakładowych powiększenia elektrowni. Oznaczmy przez

I_{\max} — sumę wszystkich prądów, wypływających z punktów zasilających (jak wyżej);

ΔE_1 — największy spadek napięcia w torach zasilających (jak wyżej);

ΔE_2 — największy spadek napięcia w sieci rozsyłowej;

b — koszt elektrowni na jeden wat największego obciążenia (jak w § 26).

Moc największych strat w torach zasilających wyniesie:

$$I_{\max} \Delta E_1,$$

a w sieci rozsyłowej, licząc, że całe obciążenie jest ześrodkowane w punktach wpływu, —

$$I_{\max} \Delta E_2.$$

Koszt powiększenia elektrowni wyrazi się wzorem:

$$F_e = \frac{b I_{\max} \Delta E_1}{\text{tory zasilające}} + \frac{b I_{\max} \Delta E_2}{\text{sieć rozsyłowa}}. \quad (d)$$

Pierwsza pozycja nie ma nic wspólnego z liczbą punktów zasilających, druga — zależy od liczby punktów tylko w tym przypadku, gdy spadek napięcia ΔE_2 zależy od liczby punktów zasilających (przy stałym przekroju s_2).

Dla zestawienia rocznych kosztów przesyłania prądu musimy jeszcze obliczyć koszt roczny wytwarzania traconej energii. Oznaczając tak, jak w § 26, przez

T — średni roczny czas trwania największych strat i

β — średni koszt bezpośredni jednej watogodziny,

otrzymamy koszt roczny wytwarzania energii, traconej w torach zasilających i sieci rozsyłowej:

$$K_b = \frac{\beta I_{\max} \Delta E_1 T}{\text{tory zasilające}} + \frac{\beta I_{\max} \Delta E_2 T}{\text{sieć rozsyłowa}}. \quad (e)$$

Pierwszy człon, tak jak we wzorze (d), nie ma nic wspólnego z liczbą punktów zasilających, a drugi — tylko warunkowo, gdy spadek ΔE_2 zależy od liczby punktów zasilających (przy stałym przekroju s_2).

Koszt roczny przesyłania prądu wyniesie (p. § 26):

$$K = 0,01 p_p F_p + 0,01 p_e F_e + K_b.$$

$$\begin{aligned}
 K = & \underbrace{0,01 p_p a_1 (2 N l_1 s_1)}_{1)} + \left[\underbrace{0,01 p_p c_1 (2 N l_1)}_{(2)} + \underbrace{0,01 p_p N C_1}_{(3)} \right] + \\
 & + \left[\underbrace{0,01 p_p a_2 [2 (\Sigma l_2) s_2]}_{(4)} \right] + \underbrace{0,01 p_p 2 (\Sigma l_2) c_2}_{(5)} + \underbrace{0,01 p_e b I_{\max} \Delta E_1}_{(6)} + \\
 & + \left[\underbrace{0,01 p_e b I_{\max} \Delta E_2}_{(7)} \right] + \underbrace{\beta I_{\max} \Delta E_1 T}_{(8)} + \left[\underbrace{\beta I_{\max} \Delta E_2 T}_{(9)} \right]. \quad (79)
 \end{aligned}$$

Przypadek 1. Spadek napięcia w sieci rozsyłowej ΔE_2 jest zgóry przepisany. W tym przypadku od liczby punktów zasilających zależą wyłącznie pozycje (2), (3) i (4). Suma tych trzech pozycji:

$$K' = \underbrace{0,01 p_p c_1 (2 N l_1)}_{(2)} + \underbrace{0,01 p_p N C_1}_{(3)} + \underbrace{0,01 p_p a_2 [2 (\Sigma l_2) s_2]}_{(4)}$$

będzie decydowała o liczbie punktów zasilających. Dzieląc obie połowy równania przez odsetek 0,01 $\cdot p_p$, otrzymamy zpowrotem sumę trzech pozycji kosztów zakładowych:

$$\left[\begin{array}{c} F' = c_1 (2 N l_1) + N C_1 + a_2 [2 (\Sigma l_2) s_2] \\ \text{przybory torów zasil.} \quad \text{miedź torów rozsył.} \\ \text{punkty zasil. i przył.} \\ \text{torów zasil.} \end{array} \right]. \quad (80)$$

A zatem, przy wyznaczaniu liczby punktów zasilających w przypadku 1-ym nie potrzeba obliczać kosztów przesyłania prądu, ani też obliczać całkowitych kosztów zakładowych, lecz wystarczy zestawić tylko trzy pozycje kosztorysowe.... F' . Na rys. 107 przedstawiono wykreślnie zależność sumy F' od liczby punktów zasilających N . Nad osią odciętych odłożono koszt $c_1 (2 N l_1) + N C_1$ w postaci linii prostej, a pod osią — koszt $a_2 [2 (\Sigma l_2) s_2]$ w postaci linii, podobnej do hiperboli. Przy zbyt małej liczbie punktów zasilających koszty zakładowe są za wielkie wskutek nadmiernej ilości miedzi w torach rozsyłowych, a przy zbyt wielkiej liczbie punktów koszty zakładowe są za wielkie wskutek nadmiernej długości sumarycznej wszystkich torów zasilających. Najmniejsza rzędna, zawarta między kresą pochyłą a hiperbolą, daje wartość najmniejszych kosztów F'_{\min} , a odpowiednia odcięta — najkorzystniejszą liczbę punktów zasilających N_k .

Dla sieci jedнопроводowej (dosyłowej lub odsyłowej) wzór (80) pozostanie w mocy z tą tylko zmianą, że odpadną współczynniki liczbowe

„2”, a współczynnik C_1' będzie oznaczał koszt przyłączenia jedнопrzewodowego (a nie dwuprzewodowego).

$$F' = c_1 (N l_1) + N C_1' + a_2 [\sum l_2] s_2]. \quad (81)$$

Przykład 42. Sieć ta sama, co w przykładzie 39-ym. Ustalić gospodarczo najkorzystniejszą liczbę punktów zasilających w dwóch alternatywach: a) wszystkie przewody — napowietrzne ($0,021 s + 0,16$) Złp., b) tory zasilające — kablowe ($0,0255 s + 2,60$) Złp., a rozsyłowe — napowietrzne ($0,021 s + 0,21$) Złp.

Dla ustalenia średniej długości l_1 rozstawiono na planie sieci kilka punktów zasilających i zmierzono długości torów zasilających od elektrowni (na rys. 106 E). Średnia arytmetyczna z tych liczb dała 1144 m. Koszt przyłączenia toru zasilającego na obu krańcach wraz z urządzeniem punktu zasilającego oszacowano na 500 Złp. Oplerając się na wynikach przykładu 39-go, przyjęto dla

$$s_2 = 10 \text{ mm}^2 \dots N = 16;$$

$$s_2 = 16 \text{ mm}^2 \dots N = 11;$$

$$s_2 = 25 \text{ mm}^2 \dots N = 8;$$

$$s_2 = 35 \text{ mm}^2 \dots N = 6;$$

$$s_2 = 50 \text{ mm}^2 \dots N = 5;$$

$$l_1 = 1144 \text{ m}; \quad \sum l_2 = 15550 \text{ m}; \quad C_1 = 500 \text{ Złp.}; \quad a_2 = 0,021 \text{ Złp.}$$

a) Tory zasilające napowietrzne; $c_1 = 0,16$ Złp.

Dla $s_2 = 10 \text{ mm}^2 \dots N = 16$. Koszt przyborów i montażu torów zasilających wyniesie:

$$c_1 2 N l_1 = 0,16 \cdot 2 \cdot 16 \cdot 1144 = 5857 \text{ Złp.};$$

koszt punktów zasilających i przyłączeń torów zasilających:

$$N C_1 = 16 \cdot 500 = 8000 \text{ Złp.},$$

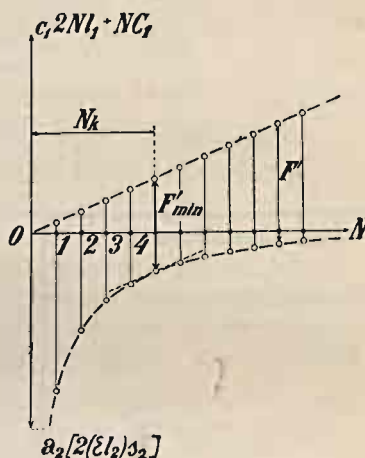
wreszcie koszt miedzi w torach zasilających:

$$a_2 [2 (\sum l_2) s_2] = 0,021 \cdot 2 \cdot 15550 \cdot 10 = 6531 \text{ Złp.},$$

w sumie:

$$F' = 5857 + 8000 + 6531 = 20388 \text{ Złp.}$$

W ten sam sposób obliczamy koszt dla $s_2 = 16 \text{ mm}^2$, 25 mm^2 , 35 mm^2 , 50 mm^2 .



Rys. 107.

Liczba punktów zasil. . $N=$	16	11	8	6	5
Przekrój przew. rozsył. . $s_2=$	10 mm ²	16 mm ²	25 mm ²	35 mm ²	50 mm ²
Koszt $c_1 2 N l_1 =$	5857 Złp.	4027 Złp.	2929 Złp.	2196 Złp.	1830 Złp.
" $N C_1 =$	8000 "	5500 "	4000 "	3000 "	2500 "
" . . . $a_2 [2 (\Sigma l_2) s_2] =$	6531 "	10450 "	16327 "	22855 "	32655 "
	20388 Złp	19977 Złp.	23256 Złp	28051 Złp.	36985 Złp.

Najkorzystniejsza liczba punktów zasilających $N_k = 11$.

b) Tory zasilające kablowe; $c_1 = 2,60$ Złp.

Liczba punktów zasil. $N=$	16	11	8	6	5
Przekrój przew. rozsył. $s_2=$	10 mm ²	16 mm ²	25 mm ²	35 mm ²	50 mm ²
Koszt $c_1 2 N l_1 =$	95 191 Złp.	65 437 Złp.	47 590 Złp.	35 693 Złp.	29 744 Złp.
" $N C_1 =$	8 000 "	5 500 "	4 000 "	3 000 "	2 500 "
" . . $a_2 [2 (\Sigma l_2) s_2] =$	6 531 "	10 450 "	16 327 "	22 855 "	32 655 "
	109 722 Złp.	81 387 Złp.	67 917 Złp.	61 548 Złp.	64 899 Złp.

Najkorzystniejsza liczba punktów zasilających $N_k = 6$.

Przypadek 2. Przekrój przewodów sieci rozsyłowej s_2 jest zgóry przepisany. W tym przypadku od liczby punktów zasilających zależą wyłącznie pozycje: (2) (3) (7) i (9). Suma tych czterech pozycji:

$$K'' = \underbrace{0,01 p_p c_1 (2 N l_1)}_{\text{przybory torów zasil.}} + \underbrace{0,01 p_p N C_1}_{\text{punkty zasil. i przył. torów zasil.}} + \underbrace{0,01 p_e b I_{\max} \Delta E_2 + \beta I_{\max} \Delta E_2 T}_{\substack{\text{powięk. elektrowni od strat} \\ \text{w torach rozsył.}}} \quad (82)$$

praca stracona
w torach rozsył.

będzie decydowała o liczbie punktów zasilających. Zależność części kosztów przesyłania prądu K'' od liczby punktów N można byłoby przedstawić zapomocą wykresu, podobnego do rys. 107, przyczem pozycje (2) i (3) dałyby pochyłą linię prostą, a pozycje (7) i (9) — krzywą, zbliżoną do hiperboli. Przy zbyt małej liczbie punktów zasilających koszt przesyłania prądu byłoby za wielkie wskutek nadmiernych strat w torach rozsyłowych, a przy zbyt wielkiej liczbie punktów koszt te byłoby za wielkie wskutek nadmiernej długości sumarycznej wszystkich torów zasilających.

Dla sieci jedнопроводowej (dosyłowej lub odsyłowej) wzór (82) pozostanie w mocy z tą tylko zmianą, że zamiast spadku napięcia dwuprzewodowego ΔE_2 wejdzie spadek jedнопроводowy Δe_2 , że odpadną współczynniki liczbowe „2”, a współczynnik C_1' będzie oznaczał koszt przyłączenia jedнопроводowego (a nie dwuprzewodowego).

$$K'' = 0,01 p_p c_1 (N l_1) + 0,01 p_p N C_1' + 0,01 p_e b I_{\max} \Delta e_2 + \beta I_{\max} \Delta e_2 T. \quad (83)$$

Przykład 43. Sieć tramwajowa ta sama, co w przykładzie 40-ym. Ustalić gospodarczo najkorzystniejszą liczbę dosyłowych punktów zasilających przy następujących współczynnikach gospodarczych w markach polskich (wg cen 1919 r.):

$b = 6\,000$ Mk.; koszt kabli z montażem $(0,7 s + 54)$ w Mk/m $C_1' = 75\,000$ Mk.;

$$p_e = p_p = 10\%; \quad T = 3\,000 \text{ godz.}; \quad \beta = 1 \text{ Mk.}$$

Prąd największy wynosi (p. przykl. 40-ty) $6318\,000 : 600 = 10\,530$ A.

Opierając się na wynikach przykładu 40-go, przyjmujemy dla $\Delta e_{\text{dzw}} = 10$ V ... $N = 34$; $\Delta e_{\text{dzw}} = 15$ V ... $N = 24$; $\Delta e_{\text{dzw}} = 20$ V ... $N = 19$; $\Delta e_{\text{dzw}} = 25$ V ... $N = 16$.

Obliczamy koszt przesyłania prądu dla $\Delta e_{\text{dzw}} = 10$ V i $N = 34$. Oprocentowanie kosztu przyborów i montażu torów zasilających wyniesie:

$$0,01 \cdot p_p \cdot c_1 (N l_1) = 0,1 \cdot 54 \cdot 34 \cdot 4\,000 = 734\,400 \text{ Mk.},$$

oprocentowanie kosztu punktów zasilających i przyłączeń torów zasilających:

$$0,01 p_p N C_1' = 0,1 \cdot 34 \cdot 75\,000 = 255\,000 \text{ Mk.},$$

oprocentowanie kosztu powiększenia elektrowni dla pokrycia strat w torach rozsyłowych:

$$0,01 p_e b I_{\max} \Delta e_2 = 0,1 \cdot 6\,000 \cdot 10\,530 \cdot 10 = 63\,180 \text{ Mk.}$$

i wreszcie koszt roczny wytwarzania pracy, traconej w torach rozsyłowych:

$$\beta I_{\max} \Delta e_2 T = 1,0 \cdot 10\,530 \cdot 10 \cdot 3\,000 = 315\,900 \text{ Mk.}$$

razem:

$$K'' = 734\,400 + 255\,000 + 63\,180 + 315\,900 = 1\,368\,480 \text{ Mk.}$$

W ten sam sposób obliczamy koszt dla $\Delta e_2 = 15$ V, 20 V i 25 V.

Liczba dosyłowych punktów zasilających $N =$	34	24	19	16
Najw. spadek napięcia w torach rozsyłowych $\Delta e_2 =$	10 V	15 V	20 V	25 V
Koszta roczne				
$0,01 p_p c_1 (N l_1) =$	734 400 Mk.	518 400 Mk.	410 400 Mk.	342 400 Mk.
$0,01 p_p N C_1' =$	255 000 „	180 000 „	142 500 „	120 000 „
$0,01 p_e b I_{\max} \Delta e_2 =$	63 180 „	94 770 „	126 360 „	157 950 „
$\beta I_{\max} \Delta e_2 T =$	315 900 „	473 850 „	631 800 „	789 750 „
	1 368 480 Mk.	1 267 020 Mk.	1 311 060 Mk.	1 410 100 Mk.

Najkorzystniejsza liczba dosyłowych punktów zasilających $N_k = 24$.

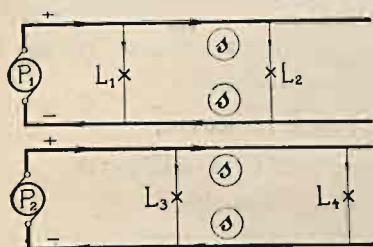
ROZDZIAŁ VIII.

Układ wieloprzewodowy.

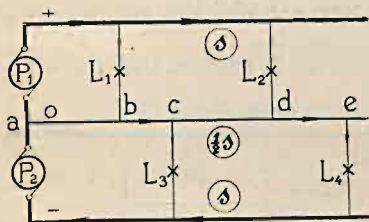
§ 37. Zasada układu wieloprzewodowego.

W poprzednich rozdziałach obliczaliśmy tory elektryczne dwuprzewodowe. Przechodzimy obecnie do torów bardziej złożonych, do wieloprzewodowych i przystosujemy do nich wyłuszczone powyżej zasady i wyprowadzone wzory.

Rys. 108 przedstawia dwa tory, niezależne od siebie: w jednym — prądnica P_1 zasila lampy: L_1 i L_2 , w drugim — prądnica P_2 zasila lampy: L_3 i L_4 . Połączmy ze sobą te dwa tory przez ze-



Rys. 108.



Rys. 109.

tknięcie przewodu ujemnego toru pierwszego z przewodem dodatnim toru drugiego na całej ich długości (rys. 109). W działaniu prądnic i lamp nie zajdzie żadna zmiana. Również nie ulegnie zmianie rozptyw prądów w przewodach skrajnych: dodatnim (+) i ujemnym (—). Natomiast nastąpi zmiana w przewodach środkowych, które wskutek ze-
tknięcia stały się jakby jednym przewodem. Przewód ten będziemy nazywali środkowym, obojętnym lub zerowym (0). Prądy w przewodzie środkowym dodały się algebraicznie, a wobec odmiennych kierun-

ków, prąd wypadkowy znacznie się zmniejszył. Gdyby w obu torach odbiorniki były ułożone symetrycznie, to prądy zniósłby się wzajem całkowicie. W naszym przykładzie prądy skasowały się całkowicie tylko w odcinku ab i cd .

Układ połączeń na rys. 109 nazywamy trójprzewodowym. Zaletą tego układu jest oszczędność w materiale przewodowym, wsku-

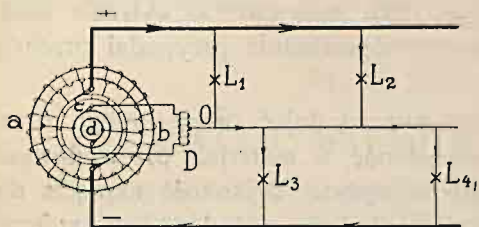
tek znacznej redukcji prądów w przewodzie środkowym. Przewód ten może mieć przekrój mniejszy (np. połowiczny) w porównaniu z przekrojem przewodów skrajnych (rys. 109), natomiast w układzie dwuprzewodowym (rys. 108) na przewody odpowiednie przypadał przekrój podwójny.

Do układu trójprzewodowego możemy dojść drogą innego rozumowania. Chcąc zaprowadzić oszczędność w materiale przewodowym, staramy się wyznaczyć napięcie jak najwyższe. Wysokość napięcia dla silników nie ma ograniczeń, natomiast dla lamp pożądane jest napięcie, któreby nie przekraczało 250 V. Przemawiają za tem ograniczeniem względy techniczne (ustrój lamp) i wzgląd na bezpieczeństwo życia. Nasuwa się myśl stosowania wyższego napięcia dla silników, a niższego — dla lamp. Można byłoby np. całkowite napięcie przeznaczać dla silników, a połowiczne — dla lamp, które przy całkowitem napięciu musiałyby się palić po dwie w szereg, a więc uzależniać się wzajem. Wystarczy jednak przeprowadzić trzeci przewód, aby uniezależnić lampy od siebie, a sieć podzielić jakby na dwie połowy. Przewód środkowy musi być pozatem połączony ze źródłem, aby odprowadzać różnicę prądów przy nierównym obciążeniu obu połów sieci. Gdy źródłem prądu będzie bateria akumulatorów, wówczas przyłączenie przewodu środkowego nie nastręczy trudności. Gorzej przedstawia się rzecz z prądnicami. Wypada w tym przypadku stosować bądź dwie prądnice połączone w szereg (jak na rys. 109), bądź prądnicę specjalną (rys. 110), w której dwa przeciwległe punkty uzwojenia twornikowego (a , b) byłyby połączone z pierścieniami ślizgowymi (c , d). Do pierścieni tych za pośrednictwem szczotek przyłącza się dławik (D), zwany dzielnikiem napięcia, a do środka uzwojenia tego dzielnika przyłącza się przewód środkowy.

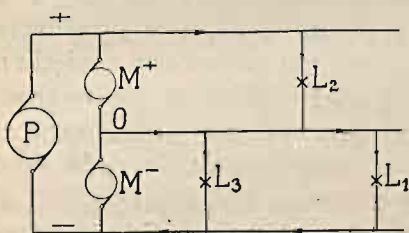
Napięcie robocze, przeznaczone do lamp, będziemy nazywali oświetleniowym, a przeznaczone do silników, — silnikowym. W układzie trójprzewodowym napięcie silnikowe jest dwa razy większe od oświetleniowego.

Jest jeszcze inny sposób przepołowienia napięcia roboczego. Równolegle do źródła prądu prądnicy P (rys. 111) włącza się dwie jednakowe maszyny elektryczne M^+ , M^- , połączone z sobą w szereg. Z punktu, łączącego te maszyny, wyprowadza się przewód środkowy. Maszyny M^+ i M^- osadzone są na wspólnym wale i tworzą jakby przetwornicę. Gdy jedna z połów sieci jest mniej obciążona (na rys. 111 — połowa plusowa), wówczas maszyna, włączona do tej połowy (M^+), staje się sil-

nikiem i napędza maszynę drugą (M^-), która odgrywa wówczas rolę prądnicy. Przy odpowiedniej regulacji (ręcznej lub automatycznej) może



Rys. 110



Rys. 111.

nastąpić zupełne wyrównanie obciążeń obu połów sieci: nadmiar obciążenia jednej połowy (na rys. — minusowej) przetwornica przeniesie na połowę mniej obciążoną (na rys. — plusową). Przy odwrotnym rozkładzie obciążeń maszyny zmieniają rolę: prądnica stanie się silnikiem, a silnik — prądnicą. Wreszcie przy zupełnie równych obciążeniach obie maszyny będą silnikami i będą biegły bez obciążenia. Przetwornicę taką nazywamy zespołem wyrównawczym.

Kojarząc dwa tory, otrzymaliśmy układ trójprzewodowy, kojarząc trzy tory w podobny sposób, otrzymamy układ czteroprzewodowy, cztery tory — pięcioprzewodowy i t. d. W praktyce znalazł zastosowanie układ trójprzewodowy, głównie dla napięcia $2 \times 220 \text{ V}$ i w kilku przypadkach wyjątkowych — układ pięcioprzewodowy.

§ 38. Spadek napięcia i rozptył prądów.

Rys. 112 przedstawia tor trójprzewodowy, obciążony na krańcu. Obliczmy spadki napięcia w dwóch przypadkach obciążenia:

1) Obie połowy sieci są obciążone jednakowo (na rys. są włączone lampki, oznaczone linjami ciągłymi, i lampki, oznaczone linjami przerywanymi). Prąd I płynie po przewodzie dodatnim, wraca — po ujemnym, a przewód zerowy jest bez prądu. Spadki napięcia w przewodzie dodatnim i ujemnym są jednakowe:

$$\Delta e^+ = \Delta e^- = Ir$$

i jednakowe są napięcia oświetleniowe w obu połowach sieci (na rys. — wykres napięcia):

$$e_z^+ = e_a^+ - \Delta e^+ \quad e_z^- = e_a^- - \Delta e^-.$$

2) Obciążenie jest tylko w jednej połowie sieci (na rys. są włączone tylko lampki, oznaczone linjami ciągłymi). Prąd I płynie po przewodzie dodatnim, wraca — po zerowym, a przewód ujemny jest bez prądu. Spadek napięcia w przewodzie dodatnim będzie taki sam, jak poprzednio

$$\Delta e^+ = Ir,$$

natomiast w przewodzie zerowym będzie większy, wobec większej oporności tego przewodu (przekrój zwykle bywa dwa razy mniejszy):

$$\Delta e^0 = Ir^0.$$

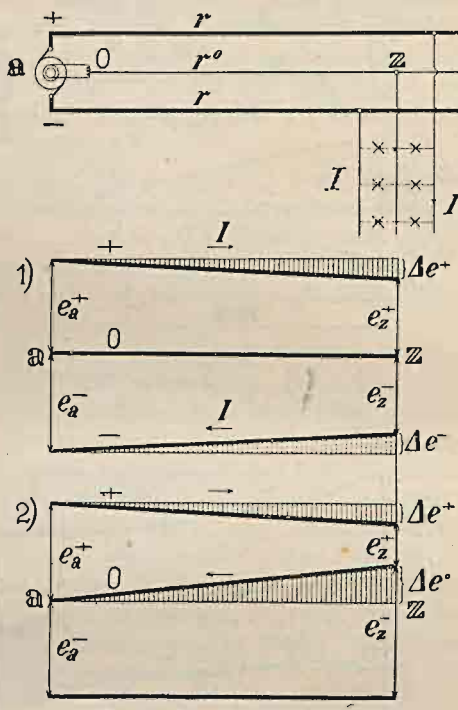
Napięcie oświetleniowe w dodatniej połowie wyniesie (na rys. wykres):

$$e_s^+ = e_a^+ - \Delta e^+ - \Delta e^0,$$

a w ujemnej, nieobciążonej

$$e_s^- = e_a^- + \Delta e^0.$$

Dla ujemnej połowy sieci przewód zerowy jest przewodem dodatnim, a więc „naturalny” kierunek prądu w tym przewodzie byłby od źródła. Ponieważ prąd płynie w kierunku odwrotnym, przeto, zamiast spadku, daje wzrost napięcia.

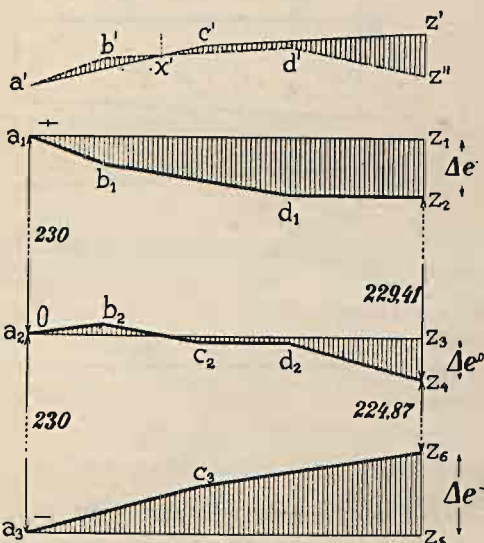
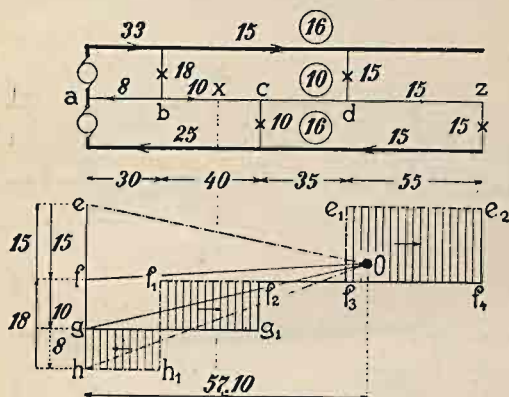


Rys. 112.

Przewody, z którymi spotykaliśmy się dotychczas, gdy były plusowe, prowadziły prąd od źródła, a gdy były minusowe — do źródła. I tu i tam prąd miał kierunek „naturalny” i wywoływał spadek napięcia roboczego. Inaczej jest z przewodem zerowym. W przewodzie tym następują wyrównywania prądu między jednym odbiornikiem a drugim. W jednym odcinku przewodu zerowego prąd płynie w tym kierunku a w innym odcinku — w kierunku odwrotnym. Co ważniejsze, każdy z tych prądów dla jednej połowy sieci ma kierunek „naturalny” i daje spadek napięcia, a jednocześnie dla drugiej połowy sieci ma kierunek „nienaturalny” i daje wzrost napięcia.

Przykład 44. Obliczyć napięcia na krańcu toru trójprzewodowego az , podanego na rys. 113. Przewody miedziane. Napięcie u źródła $\dots 2 \times 230 \text{ V}$.

Rozwiązanie rachunkowe. Spadek napięcia w przewodzie dodatnim:



Rys. 113.

$$\Delta e_{az}^+ = \frac{1}{57.16} (33 \cdot 160 -$$

$$- 18 \cdot 130 - 15 \cdot 55) = + 2,32 \text{ V},$$

w przewodzie zerowym:

$$\Delta e_{az}^0 = \frac{1}{57.10} (- 8 \cdot 160 +$$

$$+ 18 \cdot 130 - 10 \cdot 90 +$$

$$+ 15 \cdot 55) = + 1,73 \text{ V},$$

a w przewodzie ujemnym:

$$\Delta e_{az}^- = \frac{1}{57.16} (- 25 \cdot 160 +$$

$$+ 10 \cdot 90) = - 3,40 \text{ V}.$$

Spadek napięcia w dodatniej połowie sieci wynosi:

$$\Delta e_{az}^+ + \Delta e_{za}^0 = \Delta e_{az}^+ - \Delta e_{az}^0 =$$

$$= 2,32 - 1,73 = 0,59 \text{ V}.$$

a w ujemnej:

$$\Delta e_{az}^0 + \Delta e_{za}^- = \Delta e_{az}^0 - \Delta e_{az}^- =$$

$$= 1,73 + 3,40 = 5,13 \text{ V}.$$

Stąd wypada napięcie oświetleniowe na krańcu toru w połowie dodatniej:

$$e_a^+ = 230 - 0,59 = 229,41 \text{ V},$$

a w połowie ujemnej:

$$e_a^- = 230 - 5,13 = 224,87 \text{ V}.$$

Rozwiązanie wykreślne. Budujemy wykresy dla przewodu zerowego. Zaczynamy od szeregu prądowego $efgh$; prądy odpływowe: 15 A (w punkcie z) i 10 A (c); prądy dopływowe: 18 A (b) i 15 A (d). Suma prądów dopływowych przewyższa sumę prądów odpływowych o 8 A. Jest to prąd wyrównawczy (w szeregu prądowym gh), wracający do źródła prądu w punkcie a . Na przelocie ac kreślimy linię gg_1 na poziomie punktu g ; punkt g oddziela na szeregu prądowym wyrównanie w punkcie a (8 A) od odpływu w punkcie c (10 A). Na przelocie cz kreślimy linię f_2f_4 na poziomie punktu f . Linia łamana $hgg_1f_2f_4e_2$ (na rys.

linja ciągła) jest kresą prądów odpływowych. W podobny sposób rysujemy kresę prądów dopływowych $hh_1f_1f_3e_1e_2$ (na rys. linja, złożona z kresk i punktów). Rzędne, zawarte między temi kresami, dają wartość prądów przewodowych. Prądy te mają kierunek „od źródła“, gdy kresa dopływu jest nad kresą odpływu, a kierunek „do źródła“ — przy układzie odwrotnym.

Wykres spadków napięcia w przewodzie zerowym będzie się składał również z kresy dopływów i kresy odpływów. Na przelocie ac kreślimy linję $a'c'$, równoległą do promienia og ; promień ten oddziela na szeregu prądowym wyrównanie w punkcie a (8 A) od odpływu w punkcie c (10 A). Na przelocie cz kreślimy linję $c'z'$, równoległą do promienia of . Linja łamana $a'c'z'$ (na rys. linja ciągła) jest kresą odpływów. W podobny sposób rysujemy kresę dopływów $a'b'd'z''$ (na rys. linja, złożona z kresk i punktów).

Kresę tę wyprowadzamy z punktu a' , z którego wychodzi kresa odpływów, gdyż spadki napięcia w przewodzie zerowym będziemy liczyli od początku toru a . Wartość tych spadków dają nam rzędne, zawarte między obiema kresami. Spadki są dodatnie, gdy kresa dopływu biegnie nad kresą odpływu, a są ujemne przy układzie odwrotnym. Punkt przecięcia tych kres x' odpowiada punktowi x , w którym panuje taki sam potencjał, jak w punkcie a .

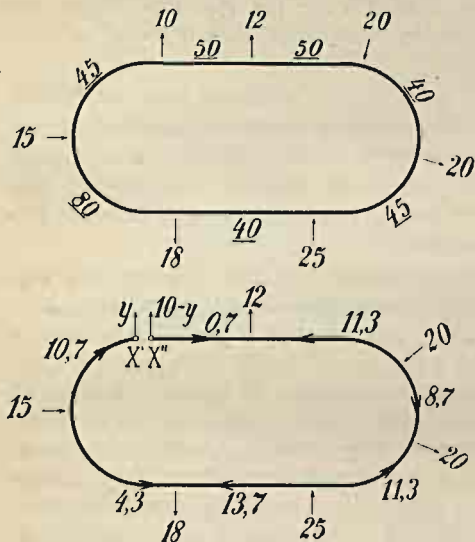
Wreszcie, budujemy wykres napięć roboczych (rys. 113). Kreślimy trzy linje poziome: a_1z_1 , a_2z_3 i a_3z_5 , odpowiadające trzem przewodom: dodatniemu, zerowemu i ujemnemu. Odstępy między linjami przedstawiają w pewnej skali robocze napięcia u źródła prądu: $a_1a_2 = e^+ = 230$ V; $a_2a_3 = e^- = 230$ V. Na prostej a_1z_1 budujemy wykres spadków napięcia w przewodzie dodatnim. W tym celu korzystamy z szeregu prądowego eh , a biegun umieszczamy z lewej strony szeregu na poziomie punktu e . Otrzymujemy linję $a_1b_1d_1z_2$. Przy prostej a_2z_3 odkładamy spadki napięcia w przewodzie zerowym, korzystając z wykresu $a'c'z'z''d'b'$. Otrzymujemy linję $a_2b_2c_2d_2z_4$. Wreszcie, na prostej a_3z_5 budujemy wykres spadków napięcia w przewodzie ujemnym $a_3c_3z_6$ (biegun umieszczamy z prawej strony szeregu prądowego eh na poziomie punktu e). Rzędne, zawarte między temi trzema linjami łamanymi, podają wartość napięcia roboczego w każdym punkcie toru. Np. na krańcu toru w dodatniej połowie sieci panuje napięcie: z_2z_1 (na rys. 113 wykres napięcia roboczego jest podany nie w skali), a w ujemnej połowie — napięcie: z_4z_5 .

Ustalenie rozptywu prądów w otwartym przewodzie zerowym, jak na rys. 112 i 113, nie przedstawiało żadnej trudności. Idąc od krańca toru ku początkowi, dodajemy dopływy, a odejmujemy odpływy i otrzymujemy w końcu wartość i kierunek prądu dla przęsła pierwszego. Inaczej jest z zamkniętym przewodem zerowym. Przewód taki przecinamy w punkcie dowolnym, obliczamy spadek napięcia jednego krańca względem drugiego tak, jak czyniliśmy to ze wszelkimi przewodami zamkniętymi, i zrównujemy ten spadek z zerem. Ta tylko zachodzi różnica, że odbiory prądu będą miały obecnie rozmaite kierunki: częściowo będą dopływami prądu, a częściowo odpływami. Przy obliczaniu momen-

tów dopływy będziemy brali ze znakiem $+$ (plus), a odpływy ze znakiem $-$ (minus).

Przykład 45. Ustalić rozpyły prądów w okólnym przewodzie zerowym z rys. 114 o przekroju jednostajnym.

Przecznymy przewód w dowolnym punkcie x , a prąd, odbierany w tym punkcie, rozszczepiamy na dwa prądy: 1) y i 2) $10-y$. Obliczamy spadek napięcia od punktu x' do x'' :



Rys. 114.

$$\Delta e_{x'x''} = \frac{1}{ks} (-y \cdot 350 + 15 \cdot 305 -$$

$$18 \cdot 225 + 25 \cdot 185 - 20 \cdot 140 +$$

$$+ 20 \cdot 100 - 12 \cdot 50).$$

Spadek ten równa się zeru, a więc

$$- 350y + 3750 = 0,$$

stąd prąd:

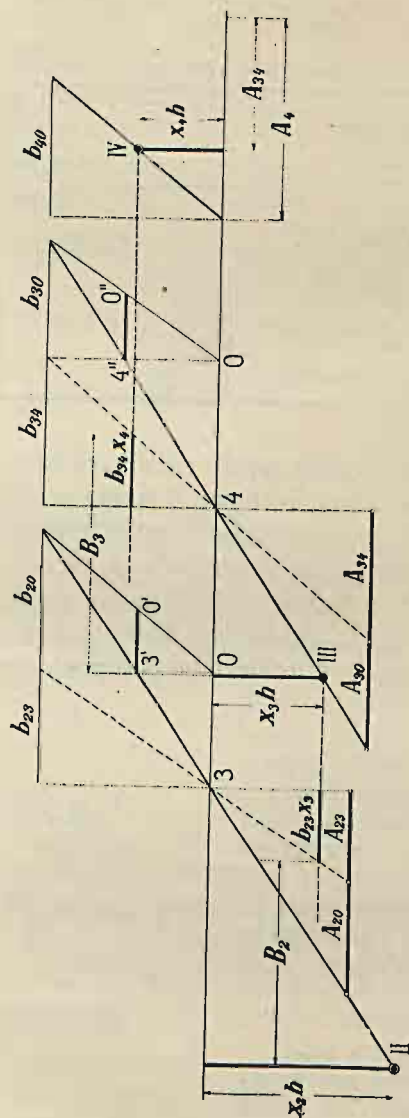
$$y \approx 10,7 \text{ A.}$$

Rozpyły prądów jest już ustalony (rys. 114).

Chcąc ustalić rozpyły prądów w sieci przewodów zerowych, trzeba się uciec do zestawiania i rozwiązywania równań. Prądy składowe obliczamy z tym założeniem, że wszystkie punkty wę-

złowe mają potencjał jednakowy. Poprzednio, gdy mieliśmy do czynienia z samymi tylko odbiorami, prądy składowe zawsze odpływały od punktów węzłowych, a więc były zaopatrzone w znak minus ($-$). Obecnie, przy dopływach i odpływach, prądy składowe będą wypadały to dodatnie (w kierunku do punktu węzłowego), to ujemne.

Dotychczas obliczaliśmy spadki napięcia w porównaniu ze stałym napięciem punktów zasilających. Przewody zerowe nie mają punktów o stałym i jednakowym napięciu. Zamiast spadków napięcia, musimy wprowadzić różnice napięć Δe względem punktu dowolnego. Ta jeszcze zajdzie różnica, że punkty zasilające miały napięcie zawsze większe od punktów węzłowych, a więc spadki napięcia były tylko dodatnie, tu zaś różnice napięć będą to dodatnie, to ujemne.



Rys. 116.

Punkt węzłowy	Bok lub odbiór	Prze- krój s mm^2	Długość l m	Przewodność		Suma momen- tów $\sum il$ Am	Prąd składowy lub odbior i' A	Suma prądów składo- wych i odbioru $\sum i' + \text{odb.}$ A	Różnica napięć na krawcach Δe V	Prąd wyrow- nawczy $I' = \Delta e \cdot g$ A	Prąd rzeczywi- sty I A
				$g = \frac{ks}{l}$	$\sum g$						
2	2 A 1		550	1,818	7,373	+ 4700	+ 8,55	+ 5,88	- 1,09	- 1,98	+ 6,57
	450		2,222	- 3000		- 6,67	- 1,09		- 2,42	- 9,09	
	300		3,333	+ 1200		+ 4,00	- 0,45		- 1,50	+ 2,50	
3	32	$ks = 1000 m \Omega^{-1}$	300	3,333	9,038	+ 600	+ 2,00	+ 4,18	+ 0,45	+ 1,50	+ 3,50
	650		1,538	+ 750		+ 1,18	- 0,64		- 0,98	+ 0,20	
	400		2,500	- 1400		- 3,5	- 1,13		- 2,82	- 6,32	
	3 B 4		600	1,667		+ 2700	+ 4,5		- 1,13	- 1,88	+ 2,62
4	4 B 3		600	1,667	6,389	- 3900	- 6,5	- 5,78	+ 1,13	+ 1,88	- 4,62
	400		2,500	- 1400		- 3,5	+ 1,13		+ 2,82	- 0,68	
	41		450	2,222		+ 1900	+ 4,22		+ 0,49	+ 1,09	+ 5,31

dopuszczalnego spadku napięcia i 1,5% dopuszczalnego wzrostu napięcia dla dwóch przypadków: 1) jedna połowa obciążona do 25%, a druga — bez obciążenia, 2) jedna połowa obciążona do 100%, a druga — do 75%.

Przy całkowitem obciążeniu po przewodach skrajnych płynie prąd $46\,000 : 460 = 100\text{ A}$.

1) W pierwszym przypadku płynie po jednym z przewodów skrajnych i po przewodzie obojętnym 25 A . W połowie nieobciążonej nastąpi wzrost napięcia wskutek obciążenia przewodu obojętnego. Obliczamy przekrój tego przewodu na dopuszczalną różnicę napięcia 1,5%:

$$0,015 \cdot 230 = 3,45\text{ V}$$

$$s^0 = \frac{25 \cdot 180}{57 \cdot 3,45} = 22,8 \approx 25\text{ mm}^2.$$

2) W drugim przypadku płynie po jednym przewodzie 100 A , po drugim — 75 A , a po przewodzie obojętnym — różnica tych dwóch prądów 25 A . Różnica napięcia w przewodzie obojętnym wyniesie:

$$\Delta e^0 = \frac{25 \cdot 180}{57 \cdot 25} = 3,16\text{ V},$$

a ponieważ spadek napięcia w obwodzie może wynosić co najwyżej:

$$0,05 \cdot 230 = 11,5\text{ V},$$

przeło w połowie bardziej obciążonej pozostanie na przewód skrajny do stracenia:

$$11,5 - 3,16 = 8,34\text{ V}.$$

Obliczamy przekrój przewodu skrajnego na $8,34\text{ V}$ spadku:

$$s = \frac{100 \cdot 180}{57 \cdot 8,34} = 38 \approx 50\text{ mm}^2.$$

Nie znając warunków zmienności obciążenia, w których będzie pracował projektowany tor trójprzewodowy, i nie wiedząc, jak będzie się rozkładało obciążenie na obie połowy, nie możemy ściśle obliczać przekrojów. Na podstawie doświadczenia.—

Obliczamy w warunkach normalnych 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.

Przykład 48. Tor ten sam, co w przykładzie poprzednim. Obliczyć przekroje na 5% dopuszczalnego spadku napięcia.

Dopuszczalny spadek napięcia dla obu połów razem wynosi:

$$\Delta E_{dzu} = 0,05 \cdot 460 = 23\text{ V}.$$

Na przewody skrajne przeznaczamy $\frac{3}{4}$ tej wartości:

$$\frac{3}{4} \cdot 23 = 17,25 \text{ V}.$$

Obliczamy przekrój przewodów skrajnych na 17,25 V (w przykładzie poprzednim liczyliśmy na 2.8,34 = 16,68 V):

$$s = \frac{2 \cdot 100 \cdot 180}{57 \cdot 17,25} = 36,5 \approx 50 \text{ mm}^2,$$

a przekrój przewodu obojętnego szacujemy na połowę:

$$s^0 = \frac{1}{2} 36,5 = 18,2 \approx 25 \text{ mm}^2.$$

Wszystkie wzory do obliczania torów dwuprzewodowych na spadek napięcia możemy zastosować do przewodów skrajnych z temi tylko zastrzeżeniami, że 1) napięciem E będzie napięcie podwójne (tak, jak gdyby nie było przewodu obojętnego!) i 2) największym spadkiem ΔE_{\max} będzie $\frac{3}{4}$ rzeczywistego spadku dopuszczalnego.

Porównajmy przekroje toru dwuprzewodowego i trójprzewodowego przy tej samej długości toru l , tem samym napięciu oświetleniowym ϵ , tym samym dopuszczalnym spadku napięcia $\Delta \epsilon_{dzw}$ i przy jednakowej mocy obciążenia:

$$\epsilon I = (2 \epsilon) (0,5 I).$$

Przekrój w torze dwuprzewodowym wyniesie:

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

a w torze trójprzewodowym:

$$s_2 = \frac{2 (0,5 I) l}{k \frac{3}{4} (2 \Delta \epsilon_{dzw})} = \frac{2}{3} \frac{Il}{k \Delta \epsilon_{dzw}}.$$

Przekroje przewodów skrajnych w torach trójprzewodowych wypadają 3 razy mniejsze, niż w torach dwuprzewodowych przy tem samym napięciu oświetleniowym.

W trójprzewodowych sieciach miejskich rozróżniamy tory zasilające od rozsyłowych tylko w przewodach skrajnych. Przewody obojętne budujemy w postaci jednej sieci, która służy zarówno do zasilania, jak i do rozsyłania prądu. Wyrównywanie prądów z obu połów sieci powinno odbywać się nie w elektrowni, ale tuż przy odbiornikach. Niema celu przesyłania niewyrównanych prądów do elektrowni za pośrednictwem osobnych przewodów zasilających, tembardziej, że cała sieć obojętna

bywa prawie zawsze dokładnie uziemiona. Przy wyznaczaniu przekrojów w sieci obojętnej dajemy zwykle:

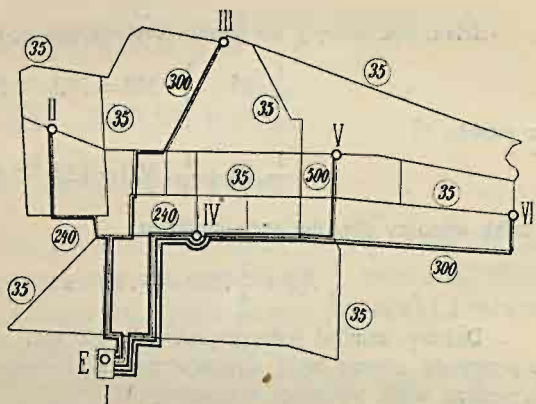
$\frac{1}{2}$ przekroju skrajnego z sieci rozsyłowej, a na szlakach zasilania ponadto $\frac{1}{4}$ przekroju skrajnego z każdego toru zasilającego.

Przykład 49. Zaprojektować sieć miejską według planu z rys. 106. Największe obciążenie 350 kW. Napięcie robocze 2×220 V. Dopuszczalny spadek napięcia ... 4%.

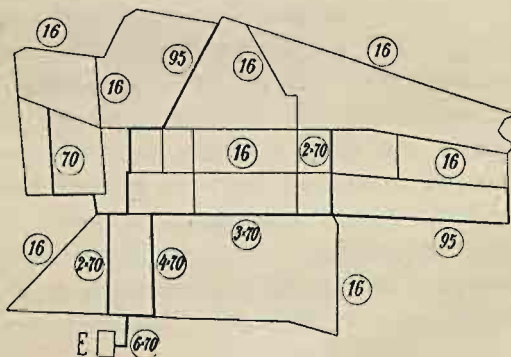
Sieć trójprzewodową będziemy obliczali tak, jak gdyby była dwuprzewodowa o napięciu podwójnym t. j. 440 V i o dopuszczalnym spadku $\frac{3}{4} \cdot 4\%$ czyli 3%. Tory zasilające wykonamy z kabli, a rozsyłowe — z przewodów napowietrznych. Dla tych warunków obliczyliśmy w przykładach 39-ym i 42-im b) liczbę punktów gospodarczo najkorzystniejszą $N_k = 6$ i ryczałtowy przekrój skrajnych przewodów rozsyłowych $s_2 = 35 \text{ mm}^2$.

Na rys. 118 rozstawiliśmy punkty zasilające w punktach węzłowych w ten sposób, że jeden punkt (I) umieściliśmy w elektrowni E, trzy punkty (II, III i VI) po krańcach miasta i wreszcie dwa ostatnie (IV i V) dość blisko jeden od drugiego, w samym środku miasta. Linje grube na rys. 118 przedstawiają tory zasilające.

Nie mając żadnych danych, co do przewidywanego rozkładu obciążenia, nie możemy ściśle obliczyć rozpywu prądów. Przypuszczalny podział obciążenia (795 A), na sześć punktów zasilających będzie następujący: I ... 85 A, II ... 120 A, III ... 110 A, IV ... 200 A, V ... 190 A, VI ... 90 A. Na punkty śródmiejskie liczyliśmy mniej więcej dwukrotne obciążenie punktów z krańców miasta. Gospodarczo najkorzystniejsze przekroje przewodów zasilających obliczyliśmy w przykładzie 30-tym. Wyniki podajemy na rys. 118.



Rys. 118.



Rys. 119.

Do obliczenia została się jeszcze sieć zerowa. Zasadniczy przekrój przewodów zerowych szacujemy na:

$$\frac{1}{2} \cdot 35 \approx 16 \text{ mm}^2.$$

Szlak, dochodzący do punktu zasilającego II, otrzyma przekrój:

$$\frac{1}{2} \cdot 35 + \frac{1}{4} \cdot 240 = 77,5 \approx 70 \text{ mm}^2,$$

do punktu III:

$$\frac{1}{2} \cdot 35 + \frac{1}{4} \cdot 300 = 92,5 \approx 95 \text{ mm}^2,$$

a szlak wspólny dla obu tych punktów:

$$\frac{1}{2} \cdot 35 + \frac{1}{4} \cdot 240 + \frac{1}{4} \cdot 300 = 152,5 \approx 2 \cdot 70 \text{ mm}^2.$$

Dajemy, zamiast jednego przewodu 150 mm^2 , dwa po 70 mm^2 z tego względu, że przewody zerowe będą napowietrzne, a zawieszanie linek grubszych od 95 mm^2 przysparza wiele trudności montażowych.

W podobny sposób obliczamy przekroje na wszelkich innych szlakach. Wyniki podaje rys. 119.