ELEKTROTECHNIKA.

Dwa wzory do obliczania sieci elektrycznych.

Napisał **Stanisław Wysocki**, dypl. inż. elektr.

Wskutek warunków wojennych, a przedewszystkiem wobec braku nafty, nasze miasta prowincyonalne przystąpiły z pośpiechem do budowy urządzeń elektrycznych. Sprawa obliczania zamkniętych sieci miejskich staje się aktualną i nie od rzeczy będzie przypomnieć naszym czytelnikom dwa wzory może nie zupełnie ścisłe, lecz prowadzące wprost do celu. Mamy tu na myśli znany wzór do określania liczby punktów zasilających i wzór do obliczania ryczałtowego przekroju przewodnika dla całej sieci rozprowadzającej. Nie będziemy podawali dowodzeń, odeślemy interesujących się tą sprawą do źródeł[1]), nadmienimy tylko, iż oba wzory zostały wyprowadzone dla sieci złożonych z wielokątów foremnych przy obciążeniu równomiernem.

Wzór do określania liczby punktów zasilających bierze za podstawę koszta zakładowe sieci i daje taką liczbę punktów, przy której koszta te stanowią minimum. Przy mniejszej bowiem ilości punktów wypadają nadmierne koszta sieci rozprowadzającej, przy większej zaś—nadmierne koszta punktów zasilających i koszta zawieszenia przewodów zasilających.

Wzór do obliczania przekroju wychodzi z założenia, iż cała sieć będzie wykonana z przewodnika o jednakowym przekroju. Zasada ta, bardzo praktyczna ze względów montażowych, wypływa z braku ścisłych danych co do przewidywanego obciążenia. Gdy rozkład i wielkość obciążenia sieci są dokładnie znane, można projektować sieć o jednakowym przekroju lub o przekrojach różnych, gdy jednak obciążenie jest tylko szacowane bądźto sumą ogólną, bądź też wykazem domniemanych obciążeń w poszczególnych punktach, niema najmniejszej racyi wyznaczania przekrojów różnych. Co się tyczy ważności wzoru, to dla sieci foremnych przy równomiernem obciążeniu wzór daje wyniki najzupełniej dokładne. Przy sieciach zaś nieforemnych i przy obciążeniu nierównomiernem żaden wzór nie może być absolutnie ścisłym. Przedewszystkiem rozkład prądu w znacznej części zależy od umiejętnego rozstawienia punktów zasilających. Przy nieudolnym wyborze punktów zasilających, przekroje w sieci rozprowadzającej muszą wypaść większe, niżby się należało. Wzór nasz tego czynnika nie uwzględnia. Natomiast dla zwykłych sieci spotykanych w praktyce, choćby nieforemnych i obciążonych zupełnie nierównomiernie, lecz przy należytem rozstawieniu punktów zasilających, wzór da zupełnie dobre wyniki, gdy współczynnik teoretyczny 0,66 (ważny dla sieci foremnych) powiększymy o 30% na „nierównomierność".

Przejdźmy do samych wzorów. Najkorzystniejsza liczba punktów zasilających N dla *napowietrznej* sieci prądu *stałego* określa się wzorem:

$$N = \frac{W}{e}\sqrt{\frac{\gamma c F}{10\left(Lm + \frac{s}{2}\right) p k W}} \quad . \; . \; . \quad (1),$$

gdzie W — całkowita ilość watów obciążenia sieci,
e — napięcie robocze w woltach,
γ — ciężar gatunkowy przewodnika,
k — współczynnik przewodnictwa,
p — procent dopuszczonego spadku napięcia (wzgl. spadku mocy) w sieci rozprowadzającej,
F — obszar zajęty przez sieć elektryczną w metr. kw.
L — średnia długość pojedyńcza przewodu zasilającego w metrach,
c — koszt 1 *kg* przewodnika,
m — koszt zawieszenia przewodnika zasilającego (montaż, izolatory) na 1 *m* długości,
s — koszt punktu zasilającego wraz z kosztem przyłączenia jednej linii zasilającej do elektrowni

} w walucie dowolnej.

Przekrój jednolity q dla przewodników całej sieci rozprowadzającej obliczamy według wzoru

$$q = a\frac{WF}{ek\varepsilon N \cdot \Sigma l}\sqrt{\frac{\lambda n}{\Sigma l}} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (2),$$

gdzie a — współczynnik $= 0{,}66$ przy sieciach foremnych, $= 0{,}85$ przy sieciach spotykanych w praktyce,
ε — dopuszczany spadek napięcia w sieci rozprowadzającej w woltach,
λ — średnia odległość wzajemna sąsiednich punktów zasilających w metrach,
n — liczba boków sieci rozprowadzającej (bokiem nazywamy część sieci, zawartą między dwoma punktami węzłowymi),
Σl — suma pojedyńczych długości wszystkich boków sieci rozprowadzającej.

Pod obszarem sieci F rozumiemy powierzchnię ograniczoną przewodami krańcowymi, przyczem obliczamy ją dość suto, pojedyńcze gałęzie otaczamy z obu stron pewnem polem, aby objąć całą sferę działania elektrowni. Średnią długość przewodu zasilającego L określamy w ten sposób, iż upatrujemy kilka punktów sieci nadających się do zasilania, przeprowadzamy do nich linie zasilające tak, jak one prawdopodobnie biedz będą, a więc możliwie wspólnym szlakiem (dla zaoszczędzenia słupów i poprzeczek), wreszcie bierzemy z osiągniętych długości liczbę średnią. Natomiast odległość λ mierzymy nie wzdłuż przewodów, lecz po liniach prostych, łączących sąsiednie punkty zasilające. Gdy punkty te układają się w prostokąty, należy brać boki a nie uwzględniać przekątni.

Co się tyczy wielkości kosztorysowych, to s przedstawia koszt dodania jednego punktu zasilającego, a więc zarówno cenę słupa, pierścieni rozdzielczych jak i koszt odpowiedniego rozszerzenia tablicy rozdzielczej w elektrowni, wszystko wraz z montażem. Natomiast koszt samego przewodu zasilającego w s nie wchodzi. Wielkość m obejmuje koszta związane z zawieszeniem przewodu zasilającego, a więc izolatory i montaż przewodu. Co się tyczy słupów, to przypuszczamy, iż przewody zasilające korzystają ze słupów sieci rozprowadzającej i dlatego nie bierzemy ich pod uwagę.

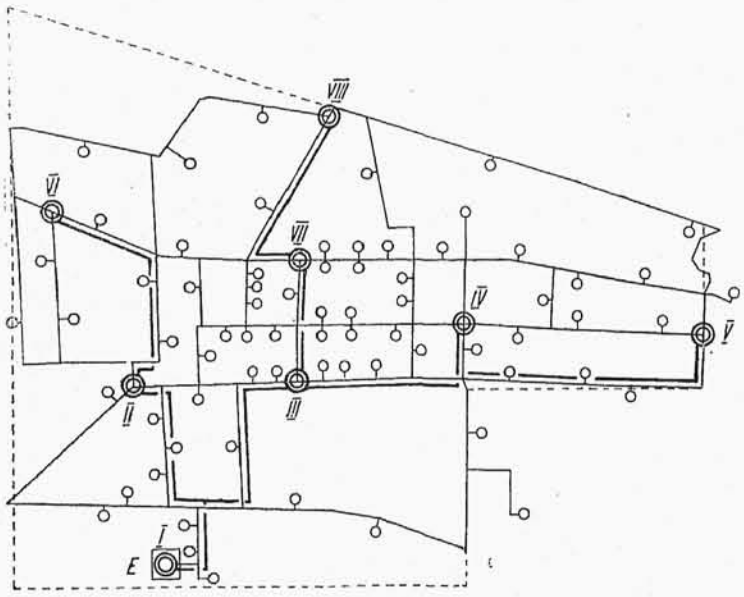
Zastosowanie wzorów objaśnimy na *przykładzie*. Rys. 1 przedstawia zaprojektowaną sieć miejską. Kółkami oznaczone są domniemane punkty obciążenia. Na linie grube, linie punktowane i kółka podwójne chwilowo nie zwracamy uwagi. Elektrownia projektuje się w punkcie E. Prąd stały 2×220 V. Przypuszczalne obciążenie każdego punktu odbiorczego 2,5 A$\times$440 V.

Przedewszystkiem musimy obliczyć liczbę punktów zasilających. W tym celu otaczamy sieć liniami punktowanemi i otrzymujemy prostokąt i trapez, których obszar $F = 2\,344\,016\ m^2$. Do obliczenia średniej długości przewodnika zasilającego musimy przyjąć pewną dowolną liczbę punktów zasilających, powiedzmy—8. Jeden punkt umieszczamy w elektrowni, inne—rozstawiamy po całym obszarze sieci. Na rysunku punkty zasilające oznaczyliśmy kółkami podwójnemi, szlaki zaś, po których będą poprowadzone przewodniki zasilające — liniami grubemi. Długości poje-

[1]) *E. T. Z.* 1899 r., str. 807: „Obliczenie najkorzystniejszej liczby punktów zasilających", A. Sengel. *Przegl. Techn.* 1906 r., str. 208: „Przybliżone obliczenie sieci elektrycznych", Stanisław Wysocki.

dyńcze przewodników zasilających wypadają następujące: I-I—0 *m*, I-II—700 *m*, I-III—750 *m*, I-IV—1400 *m*, I-V—2050 *m*, I-VI—1400 *m*, I-VII—1100 *m*, I-VIII—1750 *m*. Średnia z tych liczb $L = 1144$ *m*. Całkowita liczba watów: 70 punktów odbiorczych po 2,5 A×440 V daje w sumie $W = 770\,000$ watów. Napięcie robocze $e = 440$ V. Dopuszczalny spadek napięcia 5% czyli $p = 5$. Przewodniki projektują się z żelaza, a więc ciężar gatunkowy $\gamma = 7{,}8$, przewodnictwo $k = 7{,}5$. Koszt 1 *kg* żelaza $c = 1{,}2$ marki, koszt zawieszenia 1 *m* przewodnika $m = 0{,}20$ marki, koszt punktu zasilającego wraz ze słupem żelaznym i z przyłączeniem $s = 1400$ marek.

$$N = \frac{77\,000}{440}\sqrt{\frac{7{,}8\,.\,1{,}2\,.\,2\,344\,016}{10\left(1144\,.\,0{,}2 + \frac{1400}{2}\right)5\,.\,7{,}5\,.\,77\,000}} \cong 5.$$



Rys. 1.

Wobec tego redukujemy liczbę punktów zasilających do pięciu, rozstawiamy je (rys. 2) możliwie równomiernie, uwzględniając jednak tę okoliczność, iż obciążenie ześrodkowane jest głównie w centrum miasta, i przystępujemy do obliczenia przekroju.

Sieć składa się z 52 boków, t. j. przewodów zamkniętych pomiędzy dwoma punktami węzłowymi. Odgałęzionych przewodów otwartych nie bierzemy pod uwagę, licząc je za przyłączenie odbiorcze. Długość pojedyńcza wszystkich 52 boków sieci daje w sumie $\Sigma l = 15\,550$ *m*. Punkty zasilające w danym wypadku układają się w trójkąty, przyczem odległości wzajemne wynoszą: I-II — 1100 *m*, I-III — 900 *m*, II-III — 570 *m*, I-IV — 820 *m*, III-IV — 600 *m*, III-V — 910 *m*, IV-V — 430 *m*. Liczba średnia $\lambda = 761$ *m*. Spadek napięcia 5% od 440 V czyli $\varepsilon = 22$ V.

$$q = 0{,}85\,\frac{77\,000\,.\,2\,344\,016}{440\,.\,7{,}5\,.\,22\,.\,5\,.\,15\,550}\sqrt{\frac{761\,.\,52}{15\,550}} = 43{,}4 \backsim \mathbf{50}\ mm^2.$$

Sieć rozprowadzająca będzie wykonana z przewodnika o przekroju 50 mm^2.

Może jeszcze pewną trudność stanowić podział obciążenia na poszczególne linie zasilające, ale tu już wypada kierować się pewnem odczuciem rozprowadzenia prądu i doświadczeniem. W danym wypadku liczymy, iż punkty krańcowe będą o $^1/_2$ mniej obciążone od środkowych, czyli linie zasilające I-II-V otrzymują po 11 kW, a linie III i IV po 22 kW.

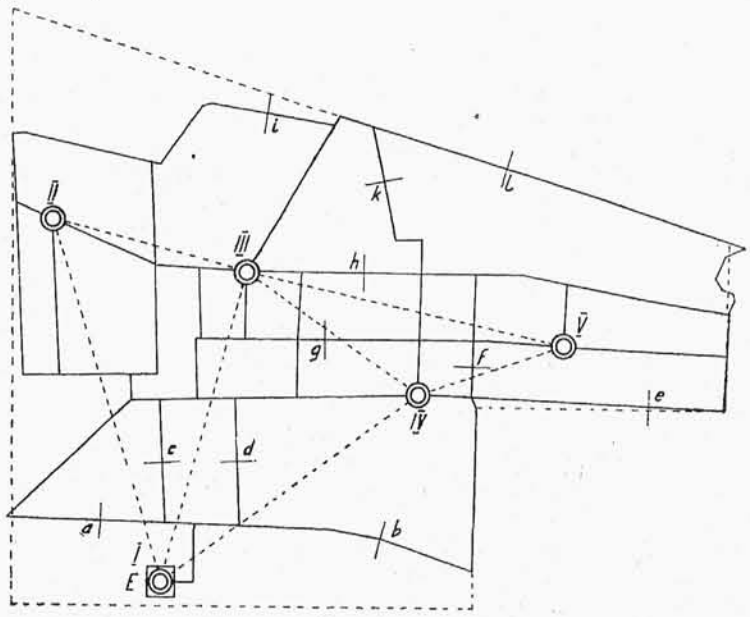
Zadanie nasze jest już rozwiązane. Powyższy sposób obliczania sieci nadaje się szczególnie do pierwszych projektów kosztorysowych, które w większości wypadków ulegają wielokrotnym przeróbkom. Szkoda pracy na rozwiązywanie—jak w danym wypadku—28 równań z 28 niewiadomemi, gdy niema pewności, czy projekt w tej postaci będzie urzeczywistniony.

Wzór (2) może być pożyteczny i w innych jeszcze wypadkach. Przedewszystkiem umożliwia sprawdzenie, czy obliczona zapomocą wzoru (1) liczba punktów zasilających jest rzeczywiście najkorzystniejsza. Dla porównania wystarczy zestawienie tylko trzech pozycyi kosztorysowych, zależnych od liczby punktów zasilających, a mianowicie: 1) kosztu materyału przewodów rozprowadzających, 2) kosztu zawieszenia przewodów zasilających i 3) kosztu punktów zasilających. Pozostałe pozycye w kosztorysie sieci nie zależą od liczby punktów zasilających, koszt materyału przewodów zasilających jest wielkością stałą: przy większej bowiem liczbie punktów przewody wypadają odpowiednio cieńsze i odwrotnie. Również wielkością stałą jest koszt zawieszenia przewodów rozprowadzających.

W naszym przykładzie obliczymy dla porównania sieć przy 4-ch punktach zasilających i przy 8-iu punktach (rys. 1). W pierwszym wypadku średnia odległość punktów zasilających $\lambda = 960$ *m*, w drugim — $\lambda = 585$ *m*. Przekrój przewodników przy 4-ch punktach wypada według wzoru (2)—około 70 mm^2, przy 8-iu punktach—około 35 mm^2.

Liczba punktów zasilających $N =$	4	5	8
Koszt przewodników rozprowadzających w mk.	20 264	14 630	10 076
Koszt zawieszenia przewodników zasilających w mk. . . .	1 740	2 120	3 660
Koszt punktów zasilając. w mk. .	5 600	7 000	11 200
Suma w mk.	27 604	23 750	24 936

Zestawienie to jest bardzo pouczające. Jeżeli zmniejszenie liczby punktów zasilających z 5 do 4 podraża sieć dość znacznie, to zwiększenie liczby punktów z 5 do 8 daje bardzo mały przyrost kosztu. Stąd wniosek, iż warunki gospodarcze pozwalają nam w danym wypadku na budowę sieci zarówno o 5 jak i o 8 punktach zasilających. Względy montażowe przemawiać będą zawsze za cieńszym przekrojem. Zresztą trzeba się nieraz kierować jeszcze innymi względami. W obecnej porze wojennej wypada nieraz budować sieć z takiego przewodnika, jaki jest na rynku. Obliczenie przekrojów według wzoru (2) dla różnych ilości punktów zasilających rozwiąże nam i to zadanie i umożliwi dostosowanie ilości punktów zasilających do danego z góry przekroju.



Rys. 2.

Jeszcze jedno zastosowanie wzoru (2). Przestawiwszy q na miejsce ε i odwrotnie, możemy dla sieci o jednakowym przekroju obliczyć dopuszczony spadek napięcia. W sieci foremnej o równomiernem obciążeniu wszystkie punkty sieci, w których prąd zbiega się z obu stron, mają napięcie jednakowe. Są to punkty najwyższego spadku napięcia. Otóż wzór (2) ze współczynnikiem teoretycznym $a = 0{,}66$ da nam dla sieci foremnej zupełnie ścisłą liczbę tego spadku. Inaczej jest z sieciami nieforemnemi. Nawet powiększony o 30% współczynnik a nie daje gwarancyi, iż wyliczona według wzoru liczba będzie rzeczywiście spadkiem maksymalnym. Zazwyczaj liczba ta odpowiada średniej wielkości spadku napięcia w punktach, w których prąd zbiega się ze stron obu. Przy wszystkich tych zastrzeżeniach jednak, obliczenie ε we-

dług wzoru (2) jest rzeczą nie bez znaczenia, gdyż daje pewne pojęcie o elastyczności sieci.

Wróćmy się raz jeszcze do naszego przykładu i obliczmy dopuszczony spadek napięcia. W zasadzie dopuszczaliśmy spadek 22 V, lecz ponieważ wyznaczyliśmy 50 mm^2 zamiast znalezionego przekroju 43,4 mm^2, przeto obecnie otrzymamy liczbę niższą od 22 V.

$$\varepsilon = 0{,}85 \frac{77\,000 \,.\, 2\,344\,016}{440 \,.\, 7{,}5 \,.\, 50 \,.\, 5 \,.\, 15\,550} \sqrt{\frac{761 \,.\, 52}{15\,550}} = 19{,}1 \text{ V.}$$

Dla sprawdzenia obliczyliśmy sieć przy 5-iu punktach zasilających (rys. 2) i przy obciążeniu w 70 punktach odbiorczych (rys. 1), jak to było w naszem założeniu. Znaleźliśmy 11 punktów w sieci (na rys. 2 oznaczone kreskami i literami od *a* do *l*), otrzymujących prąd z obu stron. Spadki napięć w tych punktach są następujące: punkt *a*—22,4 V, punkt *b*—21,3 V, punkt *c*—21,6 V, punkt *d*—19,4 V, punkt *e*—19,4 V, punkt *f*—11,3 V, punkt *g*—19,0 V, punkt *h*—18,8 V, punkt *i*—19,4 V, punkt *k*—23,4 V, punkt *l*—17,4 V.

Średnia z tych liczb 19,7 V nie wiele się różni od znalezionej przez nas 19,1 V, natomiast najwyższy spadek napięcia w punkcie *k* przekracza nawet dopuszczone przez nas 5% napięcia roboczego. Niema w tem zresztą nic zdrożnego, tem bardziej, iż całe rozmieszczenie obciążenia jest tylko domniemane. Można być pewnym, iż przy obciążeniu rzeczywistem najwyższe napięcie wypadnie w innym punkcie. Rozbieżność znalezionych jedenastu liczb, wahających się od 11,3 do 23,4, dowodzi nieforemności naszej sieci, nierównomierności obciążenia, albo wreszcie niezbyt udatnego rozstawienia punktów zasilających.

Na tem moglibyśmy właściwie zakończyć nasz artykuł, jakkolwiek mówiliśmy wyłącznie o sieciach napowietrznych i o prądzie stałym. Inne sieci nie wchodzą dziś na porządek dzienny. Chcąc jednak wyczerpać tę sprawę, podamy wszystkie modyfikacye wzoru (1) i (2).

Dla sieci podziemnej prądu stałego:

$$N = \frac{W}{e} \sqrt{\frac{100\, b F}{L\left(m + d + \frac{s}{2L}\right) p k W}} \quad . \; . \quad (1^a),$$

gdzie $d + bq$ — koszt 1 *m* kabla jednożyłowego o przekroju q mm^2.

Dla sieci napowietrznej prądu trójfazowego:

$$N = \frac{W}{e \cos\varphi} \sqrt{\frac{\gamma c F}{6{,}67\,(f + h)\, p k W}} \quad . \; . \; . \quad (1^b),$$

gdzie h — koszt stacyi transformatorowej, tablicy, doprowadzenia prądu z sieci pierwotnej, montażu i t. p., lecz bez transformatora,

$f + gw$ — koszt transformatora o mocy w watów,

$\cos\varphi$ — współczynnik mocy.

Dla sieci kablowej prądu trójfazowego:

$$N = \frac{W}{e \cos\varphi} \sqrt{\frac{50\, b F}{(f + h)\, p k W}} \quad . \; . \; . \; . \quad (1^c),$$

gdzie $d + bq$ — koszt 1 *m* kabla trójżyłowego o przekroju $3 \times q$ mm^2.

Dla wszelkich sieci prądu trójfazowego:

$$q = a \frac{50\, W F}{e^2 \cos^2\varphi\, k p N \,.\, \Sigma l} \sqrt{\frac{\lambda n}{\Sigma l}} \quad . \; . \; . \quad (2^a).$$

Zwisanie przewodów napowietrznych.

Podali: inż. **I. Bratman** i **L. Szejnman.**

Przy projektowaniu i budowie sieci elektrycznych wysokiego napięcia, zasilanych przez elektrownie okręgowe, bądź też w poszczególnych wypadkach przenoszenia energii elektrycznej na daleką odległość, mechaniczne wykonanie linii wysokiego napięcia nabiera szczególnego znaczenia. Konieczność uchronienia ludzi od nieszczęśliwych wypadków, szczególnie groźnych przy stosowaniu wysokich napięć, jak również potrzeba ochrony przewodników słabego prądu, znajdujących się w pobliżu projektowanej linii—spowodowały powstanie całego szeregu przepisów, normujących techniczne szczegóły zawieszenia przewodników wysokiego napięcia, jak np. odległość pomiędzy poszczególnymi przewodnikami, najmniejszą dozwoloną odległość dolnego przewodnika od ziemi, stosowanie drutów i siatek ochronnych i t. p., oraz przepisów, ustalających najbardziej niekorzystne zewnętrzne warunki mechanicznego obciążenia przewodników. Warunki te dotyczą przedewszystkiem zmian, jakim podlega przewodnik pod wpływem wahań temperatury zewnętrznej, oraz dodatkowych obciążeń z powodu osadów atmosferycznych, obciążeń, dochodzących w porze zimowej do znacznych wielkości. Wszystkie wspomniane czynniki wpływają bezpośrednio na zwis przewodnika, zawieszonego między dwoma słupami. Wielkość zwisu zmienia się pod wpływem wahań tych czynników zewnętrznych. Z bezpośredniej zależności wysokości zawieszenia linii, a więc wielkości, oraz liczby projektowanych słupów, od ustalenia strzałki zwisania wynika wielkie znaczenie, jakie posiada rozpatrzenie warunków i sposobu obliczania tej strzałki, stanowiące treść niniejszego artykułu.

Przepisy Z. N. E. ustalają wysokość 6 *m*, jako najmniejszą dozwoloną odległość od ziemi przewodnika zasilanego prądem o wysokiem napięciu (powyżej 250 V w stosunku do ziemi). Przepis ten często bywa obostrzony przez specyalne warunki prowadzenia linii. Między innemi przy krzyżowaniu się z torem kolejowym lub szosą, wzdłuż której biegną druty telegraficzne, względnie przewodniki sygnalizacyi elektrycznej, odległość pionowa między przewodnikami silnego i słabego prądu musi być co najmniej 2 *m*, odległość najniższego punktu przewodnika od ziemi zaś — 7 *m*. Jak już wyżej zaznaczono, przy obliczaniu odległości od ziemi przepisy odpowiednie przewidują warunki najbardziej niekorzystne dla strzałki zwisania tak pod względem temperatury, jak i sposobu umocowania przewodników na izolatorach. Jak wiadomo, istnieje pewna stała zależność pomiędzy wielkością strzałki a mechanicznem naprężeniem, panującem w danym odcinku przewodnika. Ustalając strzałkę zwisania, otrzymujemy przez to samo określoną wielkość naprężenia i odwrotnie, znajomość określonego dozwolonego naprężenia w przewodniku pozwala nam obliczyć strzałkę. Według przepisów kolejowych i telegraficznych dozwolone naprężenie powinno równać się co najmniej $^1/_{10}$ wielkości naprężenia rozrywającego; innemi słowy, przepisy te wymagają dziesięciokrotnego zabezpieczenia przewodnika przed rozerwaniem.

Już z tego, że naprężenie w przewodnikach jest podstawą do obliczenia słupów i podpór na wytrzymałość, widać, jak nieodzownem jest wyznaczenie strzałki zwisania całej linii napowietrznej.

Przy ustalaniu rozpiętości, t. j. odległości pomiędzy sąsiednimi słupami, kwestya strzałki odgrywa również rolę poważną. Jeżeli porównamy dwie różne rozpiętości przewodników, mających jednakowe zwisy, to oczywistem jest, że naprężenie w przewodniku o rozpiętości większej będzie większe; odwrotnie więc, chcąc przy większej rozpiętości zachować to samo naprężenie w przewodniku, musimy mu nadać większą strzałkę zwisania. Przy wielkich rozpiętościach będziemy więc mieli do czynienia z dużemi strzałkami, a co za tem idzie z wysokimi i kosztownymi słupami dla utrzymania przepisanej odległości od ziemi. Ta okoliczność wpływa hamująco na stosowanie zbyt dużych rozpiętości, które mogłyby się wydawać jako bardziej oszczędnościowe, ze względu na zmniejszenie ilości słupów, podpór, izolatorów, oraz ułatwiony i mniej kosztowny montaż. Przy obliczaniu więc najbardziej ekonomicznej rozpiętości względy powyższe powinny być brane na uwagę.

Przepisy specyalne niektórych instytucyi, a mianowicie kolei i telegrafów państwowych, wyraźnie żądają podania w projektach linii wysokiego napięcia strzałek zwisania przewodników przy różnych temperaturach, poczynając od —5° C. co każde 10° wzwyż, aż do 40° C. i dopiero po otrzy