

## ROZDZIAŁ IV.

# PRZEWODY WYSOKIEGO NAPIĘCIA.

Przewody elektryczne, zarówno napowietrzne, jak podziemne (kable), przedstawiają pod względem naprężeń elektrycznych, w nich występujących, układy walcowe. Obliczenie na tej podstawie ich wytrzymałości elektrycznej, jakkolwiek stosunkowo proste, komplikuje się jednak skutkiem ubocznych zjawisk, zachodzących w izolacji przewodów. Wskutek tego znacznie się obniża granica napięcia, przy którym mają one pracować normalnie.

Przy przewodach napowietrznych są to zjawiska ulotu elektrycznego, a przy kablach zjawiska, zachodzące w ich izolacji. W jednym i drugim przypadku mamy do czynienia ze zjawiskami jonizacji warstwy, izolującej przewody.

W następstwie zajmiemy się wyłącznie tą stroną zagadnienia, która interesuje nas z punktu widzenia wytrzymałości elektrycznej tych układów.

### 1. Ulotność przewodów napowietrznych.

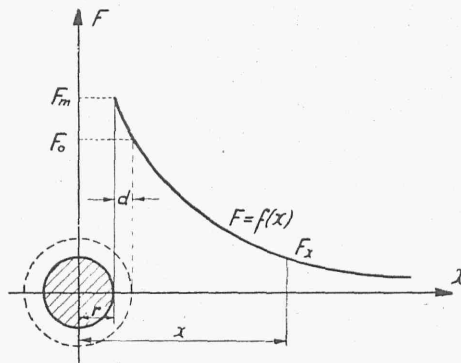
Obliczanie naprężeń elektrycznych w linjach napowietrznych polega na, poznanych w Rozdz. I, prawidłach naprężeń układów walcowych. Idzie przy tem zwykle o znalezienie takiego wzajemnego odstępu przewodów o danej grubości, aby nie dopuścić do wyładowań między nimi. Przy napięciach niższych względy techniczne (umocowanie, kołysanie się przewodów i t. d.) zapewniają zwykle dostateczną wytrzymałość elektryczną układu przewodów. Przy wyższych natomiast występują zjawiska wyładowań niezupełnych, zmuszające do zastosowania większych odstępów, niżby to wypadało ze zwykłego obliczenia naprężeń elektrycznych.

Drut pod wysokiem napięciem, po przekroczeniu pewnej granicy tego napięcia, zaczyna świecić w ciemności. Są to wyładowania jarzące, zachodzące między nim, a drugą elektrodą, np. drugim drutem, ziemią lub przedmiotem uziemionym. Przewody linji

elektrycznych zwykle, wykazują te zjawiska przy napięciach powyżej mniej więcej 80 kV. Zjawisko jarzenia się przewodów może przybrać postać wyładowań snopiastych, wytryskujących z nierówności i występow na przewodach, zwłaszcza przy linkach. Pociąga to za sobą stałą stratę energii, która uchodzi w powietrze. Nazywamy to *ulotem elektrycznym* albo (według Steinmetza) *koroną elektryczną* i mówimy, że linia posiada *ulotność*.

Zjawisko takie występuje, jeżeli napięcie robocze jest nieco — o określoną wartość — większe od napięcia krytycznego  $V_0$  danego układu. Napięcie to, przy którym zaczyna się zjawiać ulot, nazywa się *napięciem ulotu* ( $V_u$ ).

Zawsze  $V_u > V_0$ . Tłumaczymy to sobie w sposób następujący (według H. J. Ryan'a):<sup>1)</sup> Naprężenie powietrza, otaczającego przewód cylindryczny, przedstawia się w funkcji odległości  $x$  od przewodu, jako pewna krzywa  $F_x = f(x)$  (Rys. 64). Dla przewodu



Rys. 64.

izolowanego od ziemi i zawieszonego do niej równolegle w wysokości  $h$ , funkcja ta posiada (Rozdz. I, wzór 20) postać:

$$F_x = \frac{V}{x \log_n \frac{2h}{r}}$$

gdzie  $V$  jest napięciem względem ziemi, a  $r$  — promieniem przewodu. Naprężenie największe będzie na powierzchni przewodu:

<sup>1)</sup> Trans. Amer. Inst. E. E. 1904.

$$F_m = \frac{V}{r \log_n \frac{2h}{r}} \quad (1)$$

Jednakowoż jarzenie się nie zjawia się odrazu, skoro tylko naprężenie na powierzchni drutu osiągnie tę wysokość; do tego potrzebna jest jeszcze jonizacja, która wystąpić może dopiero wtedy, skoro jony mają do dyspozycji pewną drogę do przebycia, aby nabrać prędkości, odpowiedniej do wywołania jonizacji lawinowej. Droga ta ( $d$ ) jest zależna od grubości drutu; przy cienkich jest ona mniejsza, a zato naprężenie potrzebne do wywołania wyładowania — większe; przy grubych odwrotnie. (Przy wszystkich drutach grubszych, niż 0,5 cm, ta droga jest prawie jednakowa i wynosi ok. 1,6 — 1,8 mm).

Jarzenie na drutach przejawia się w postaci warstwy świecącej, o grubości równej owej drodze przebiegu jonów. Warstwa ta, będąc dobrze przewodzącą, przedstawia niejako zwiększenie średnicy przewodu; na granicy zewnętrznej tej warstwy panuje właśnie naprężenie krytyczne:

$$F_0 = \frac{V_0}{(r+d) \log_n \frac{2h}{r+d}} \quad (2)$$

Im bliżej przewodu, tem naprężenie jest większe, przeto naprężenie ( $F_m$ ), bez warstwy świecącej na powierzchni drutu, musi być większe od  $F_0$ ;  $F_m > F_0$ .

Na podstawie licznych pomiarów znaleziono, że między  $F_m$  i  $F_0$  zachodzi związek:

$$F_m = F_0 \left( 1 + \frac{0,301}{\sqrt{\delta \cdot r}} \right)$$

gdzie  $\delta$  jest znanym współczynnikiem korekcyjnym ze względu na temperaturę i ciśnienie barometryczne (Rozdz. II, wzór 5), a  $r$  promieniem przekroju drutu.

Jako naprężenie krytyczne F. W. Peek<sup>1)</sup> podaje wartość 29,8 kV/cm dla drutów i 25,7 kV/cm dla linek siedmiożyłowych tego samego co drut przekroju. W wartościach skutecznych dla prądu zmiennego te naprężenia wyniosą odpowiednio 21,1 i 18,2 kV/cm.

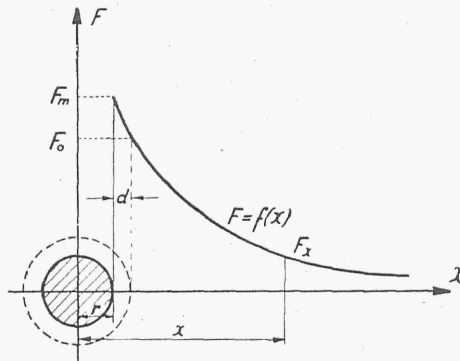
Stosunek  $m$  naprężenia krytycznego dla pewnego przewodu do naprężenia krytycznego dla przewodu doskonale gładkiego wynosi:

<sup>1)</sup> Journ. Am. Inst. E. E. 1920.

elektrycznych zwykle, wykazują te zjawiska przy napięciach powyżej mniej więcej 80 kV. Zjawisko jarzenia się przewodów może przybrać postać wyładowań snopiastych, wytryskujących z nierówności i występow na przewodach, zwłaszcza przy linkach. Pociąga to za sobą stałą stratę energii, która uchodzi w powietrze. Nazywamy to ulotem elektrycznym albo (według Steinmetza) koroną elektryczną i mówimy, że linja posiada ulotność.

Zjawisko takie występuje, jeżeli napięcie robocze jest nieco — o określoną wartość — większe od napięcia krytycznego  $V_0$  danego układu. Napięcie to, przy którym zaczyna się zjawiać ulot, nazywa się napięciem ulotu ( $V_u$ ).

Zawsze  $V_u > V_0$ . Tłumaczymy to sobie w sposób następujący (według H. J. Ryan'a):<sup>1)</sup> Naprężenie powietrza, otaczającego przewód cylindryczny, przedstawia się w funkcji odległości  $x$  od przewodu, jako pewna krzywa  $F_x = f(x)$  (Rys. 64). Dla przewodu



Rys. 64.

izolowanego od ziemi i zawieszonego do niej równolegle w wysokości  $h$ , funkcja ta posiada (Rozdz. I, wzór 20) postać:

$$F_x = \frac{V}{x \log_n \frac{2h}{r}}$$

gdzie  $V$  jest napięciem względem ziemi, a  $r$  — promieniem przewodu. Naprężenie największe będzie na powierzchni przewodu:

<sup>1)</sup> Trans. Amer. Inst. E. E. 1904.

$$F_m = \frac{V}{r \log_n \frac{2h}{r}} \quad (1)$$

Jednakowoż jarzenie się nie zjawia się odrazu, skoro tylko naprężenie na powierzchni drutu osiągnie tę wysokość; do tego potrzebna jest jeszcze jonizacja, która wystąpić może dopiero wtedy, skoro jony mają do dyspozycji pewną drogę do przebycia, aby nabrać prędkości, odpowiedniej do wywołania jonizacji lawinowej. Droga ta ( $d$ ) jest zależna od grubości drutu; przy cienkich jest ona mniejsza, a zato naprężenie potrzebne do wywołania wyładowania — większe; przy grubych odwrotnie. (Przy wszystkich drutach grubszych, niż 0,5 cm, ta droga jest prawie jednakowa i wynosi ok. 1,6 — 1,8 mm).

Jarzenie na drutach przejawia się w postaci warstwy świecącej, o grubości równej owej drodze przebiegu jonów. Warstwa ta, będąc dobrze przewodzącą, przedstawia niejako zwiększenie średnicy przewodu; na granicy zewnętrznej tej warstwy panuje właśnie naprężenie krytyczne:

$$F_0 = \frac{V_0}{(r+d) \log_n \frac{2h}{r+d}} \quad (2)$$

Im bliżej przewodu, tem naprężenie jest większe, przeto naprężenie ( $F_m$ ), bez warstwy świecącej na powierzchni drutu, musi być większe od  $F_0$ ;  $F_m > F_0$ .

Na podstawie licznych pomiarów znaleziono, że między  $F_m$  i  $F_0$  zachodzi związek:

$$F_m = F_0 \left( 1 + \frac{0,301}{\sqrt{\delta \cdot r}} \right)$$

gdzie  $\delta$  jest znanym współczynnikiem korekcyjnym ze względu na temperaturę i ciśnienie barometryczne (Rozdz. II, wzór 5), a  $r$  promieniem przekroju drutu.

Jako naprężenie krytyczne F. W. Peek<sup>1)</sup> podaje wartość 29,8 kV/cm dla drutów i 25,7 kV/cm dla linek siedmiożyłowych tego samego co drut przekroju. W wartościach skutecznych dla prądu zmiennego te naprężenia wyniosą odpowiednio 21,1 i 18,2 kV/cm.

Stosunek  $m$  naprężenia krytycznego dla pewnego przewodu do naprężenia krytycznego dla przewodu doskonale gładkiego wynosi:

<sup>1)</sup> Journ. Am. Inst. E. E. 1920.

dla nowych, gładkich drutów	1,00
„ drutów chropowatych	0,98 ÷ 0,88
„ linek	0,89 ÷ 0,72

Napięcie maksymalne, przy którym występuje zjawisko jarzenia się drutów, czyli napięcie ulotu, przy uwzględnieniu współczynników korekcyjnych wynosi:

$$V_u = m \delta F_m r \log_n \frac{2h}{r}$$

Uwzględniając wartości  $F_0$  i  $F_m$

$$V_u = 29,8 m \delta \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{\delta r}}\right) r \log_n \frac{2h}{r} \quad (3)$$

Powyższy wzór wyraża napięcie ulotu dla jednego przewodu względem ziemi w wartościach maksymalnych. Przy układzie dwuprzewodowym trzeba otrzymaną wartość pomnożyć przez 2, a przy trójfazowym przez  $\sqrt{3}$ .

Napięcie ulotu zmniejsza się z rosnącym promieniem, t. zn. ulot występuje prędzej przy cienkich drutach, niż przy grubych. Ponadto zależy od rodzaju i stanu przewodów, oraz stanu atmosfery. W razie silnych opadów, odwilży i t. p. zmniejsza się o 20% wartość  $V_u$ , obliczona dla ładnej pogody.

Ulotność powoduje straty energii, którą można zmierzyć. Wprawdzie teoretycznie powinno się ją uwzględnić przy każdym napięciu, panującym między dwoma przewodami, lecz zwykle jest ona znikomo mała. Dopiero kiedy napięcie robocze przekroczy wartość napięcia ulotu, straty stają się wyraźne i zależą od kwadratu różnicy tych napięć. Prócz tego zależą od średnicy drutu, odległości przewodów, częstotliwości (są do niej proporcjonalnie w granicach częstotliwości technicznej), stanu atmosfery i t. d.

Te zależności można wyrazić otrzymanym doświadczalnie wzorem P e e k a <sup>1)</sup>

$$p = \frac{344}{\delta} f \sqrt{\frac{r}{h}} \left[ V - V_u \right]^2 \cdot 10^{-5} \text{ kW/km} \quad (4)$$

dla jednego przewodu; napięcie tu wchodzi — w wartościach skutecznych — w kV,  $r$  i  $h$  — w cm.

Straty do pewnego stopnia są zależne także od kształtu krzywej napięcia. Dla dwóch bowiem krzywych o tej samej amplitudzie, lecz innego kształtu,

<sup>1)</sup> l. c.

czas trwania ulotu jest dłuższy przy krzywej płaskiej niż przy ostrej.

Straty z powodu ulotności, jakkolwiek w normalnych warunkach niewielkie, mogą w niekorzystnych warunkach stać się stosunkowo znaczne (parę kW na kilometr). To też przy obliczaniu przewodów należy skontrolować, jakie straty będą i dobrać odpowiednie odstępy przewodów, a nawet ich grubości tak, aby napięcie ulotu nie było większe od napięcia roboczego, ale jednak możliwie się do niego zbliżało (ze względu na koszt przewodów i słupów).

Dla przykładu podam, że przy 110 kV przewody o przekroju  $70 \text{ mm}^2$  (10,5 mm grube) pracują normalnie bez większych strat skutkiem ulotności. Jednak przy 220 kV musiałyby one mieć przekrój  $360 \text{ mm}^2$ , t. j. ok. 25 mm średnicy, aby straty te utrzymać na tej samej wysokości. Przewód taki pod względem obciążenia prądem elektrycznym byłby bardzo źle wyzyskany. Celem lepszego wyzyskania stosujemy przewody z materiału o mniejszej przewodności właściwej n. p. aluminiowe lub stalowo-aluminiowe zamiast miedzianych, lub też nawet — w ostatnich latach — linki wydrażone, o średnicy do 40 i więcej milimetrów.

W niektórych przypadkach ulot nawet może być pożyteczny, gdyż skutkiem działania wentylowego może tłumić przepięcia (t. j. nagłe, zwykle krótkotrwałe, podskoki napięcia roboczego).

## 2. Naprężenia elektryczne w kablach.

Kabel, służący do przesyłania energii elektrycznej, składa się z jednej lub kilku, izolowanych od siebie, żył przewodzących, z warstwy izolacyjnej, izolującej te żyły od siebie i od ziemi, i z płaszcza metalowego (ołowianego) pokrytego nadto zwykle pancierzem stalowym. Kabel jednożyłowy przedstawia zatem kondensator walcowy, którego jedną okładziną jest żyła, drugą — płaszcz, a dielektrykiem — warstwa izolacyjna. Kabel wielożyłowy uważać zaś można jako układ kondensatorowy, przy którym występują pojemności żył między sobą i względem ziemi.

Kable, stosowane do wysokiego napięcia, wymagają bardzo starannego wykonania przy wyrobie ich i używaniu; na pierwszy plan wysuwa się kwestja wytrzymałości elektrycznej układu oraz strat w izolacji kabla.