

PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY

ORGAN STOWARZYSZENIA ELEKTROTECHNIKÓW POLSKICH.

WYCHODZI 1-go i 15-go KAŻDEGO MIESIĄCA.

<p>PRZEDPŁATA: kwartalnie zł. 6.— Cena zeszytu 1 zł.</p>	<p>Biuro Redakcji i Administracji: Warszawa, Czackiego № 5 m. 24, I piętro (Gmach Stowarzyszenia Techników), telefon № 90-23. Administracja otwarta codziennie od g. 12 do g. 4 po poł. - Redaktor przyjmuje we wtorki od godziny 7-ej do 8-ej wieczorem. - Konto № 363 Pocztovej Kasy Oszczędności.</p>	<p>CENNIK OGŁOSZEŃ: Ogłoszenia jednoraz. na 1/1 str. zł. 120 " " na 1/2 " " 75 " " na 1/4 " " 40 " " na 1/8 " " 20 Strona tytułowa (I) 50 proc. drożej, " okładki zewn. (II) 20% " " wewn. (II) i (III) 20% droż. Ogłoszenia strony tytułowej przyjmowane są tylko całostronicowe. Podwyżka cennika ogłoszeń obowiązuje wszystkie już zlecane ogłoszenia od dnia zmiany cen bez uprzedniego zawiadom.</p>
---	---	---

Rok VII.

Warszawa, 1 maja 1925 r.

Zeszyt 9.

Podstawy wytrzymałości elektrycznej.

prof. Kazimierz Drewnowski.

Stosowanie coraz wyższych napięć elektrycznych wysunęło na plan pierwszy sprawę izolacji urządzeń elektrotechnicznych, która u nas jest mało znana. Nawet literatura zagraniczna nie posiada jeszcze (początek 1925) dzieła, któreby w sposób wyczerpujący przedstawiało najnowsze poglądy i wyniki doświadczeń praktycznych w tej dziedzinie. Za to literatura periodyczna przynosi mnóstwo przyczynków. Aby szersze koła elektrotechników polskich zapoznać z tą sprawą, która przy zbliżającej się elektryfikacji Polski, będzie przedstawiać niemałe znaczenie dla kraju, postaram się ująć rzecz możliwie przystępnie i wszechstronnie w szeregu artykułów o „Materiałach i układach izolacyjnych”.

W pierwszym artykule podam zasady wytrzymałości układów elektrycznych, stanowiące zastosowanie znanych praw elektrostatyki. W następnych zaś przejdę pokrótce najważniejsze materiały izolacyjne, jak: powietrze, olej, porcelanę, papier oraz układy izolacyjne, jak: kable i izolatory różnego rodzaju. Każdy artykuł stanowić będzie zamkniętą w sobie całość. (Przyp. aut.).

Wysokiemu napięciu towarzyszą — w rozmaitych warunkach — różne zjawiska, przeważnie świetlne i ciepłe, występujące w środowisku (dielektryku), otaczającym miejsca o wielkim potencjale (elektrody). W praktyce codziennej staramy się zwykle zjawisk tych unikać, są one bowiem niepożądane, a nawet szkodliwe. Miejscami, między którymi występują one, mogą być np. przewody linii elektrycznych, uzwojenia maszyn i transformatorów, wogóle — każde dwa punkty urządzenia elektrycznego, wykazujące różnicę potencjałów. Nieprzewidziane wyładowania między temi punktami psują izolację, przedzielającą te punkty, czyli dielektryk, przeszkadzając w normalnym ruchu urządzeń elektrycznych; staramy się więc uniknąć takich wyładowań, względnie je unieszkodliwić. Na pierwszy plan przy wysokim napięciu wysuwa się zatem sprawa doskonałości izolacji przewodów, uzwojeń maszyn i transformatorów i wogóle urządzeń elektrycznych oraz jej odporność wobec zjawisk wyżej opisanych, czyli wytrzymałość elektryczna.

Dielektryk, będący pod napięciem, znajduje się w polu elektrycznym, wytworzonym przez to napięcie. Zagadnienia podstawowe z nauki o wytrzymałości elektrycznej opierają się zatem w głównej mierze na

wyznaczeniu układu pola elektrycznego w dielektryku, a więc na prawach elektrostatyki.

1. Naprężenie dielektryku i jego wytrzymałość elektryczna.

Zjawiska, jakie zachodzą w izolatorach — w najszerszym tego słowa znaczeniu, — wyprowadzić się dadzą z własności dielektryku idealnego, znajdującego się w tem polu. Jako taki rozumieć należy dielektryk o jednolitej strukturze, t. j. posiadający wszędzie tę samą stałą dielektryczną ϵ i tę samą przewodność właściwą γ . W rzeczywistości materiały izolacyjne mają strukturę niejednorodną, co w bardzo znacznym stopniu wpływa na ich własności elektryczne; można jednak wyobrazić sobie w dielektryku pewną warstwę jednolitą, a nawet bardzo często — taką znaleźć i rozpatrywać. W elektrotechnice dielektryki są przeznaczone do oddzielania części przewodzących prąd, wzgl. będących pod napięciem, znajdują się przeto wtedy pod działaniem pola elektrycznego. Ważne jest więc poznanie wpływu, jaki pole elektryczne wywiera na dielektryk.

Naprężenia. — Dielektryk, poddany działaniu napięcia V wzgl. natężenia pola F , wywołanego przez to napięcie, znajduje się w stanie naprężenia elektrycznego. Przy zwiększaniu napięcia wzrasta to naprężenie, co pociąga za sobą pewne zmiany w dielektryku, mogące zakończyć się zniszczeniem spoiwości jego cząstek, t. j. przebicciem. Mówimy wtedy, że dielektryk jest naprężany na przebiccie.

Naprężenia elektryczne są więc zależne od przyłożonego napięcia, względnie od natężenia pola, w którym znajduje się dielektryk. W praktyce wyrażamy naprężenie w voltach na centymetr długości linii natężenia pola, t. j. w voltach na centymetr grubości dielektryku. Naprężenie elektryczne znane jest w literaturze obcej często pod nazwą „gradient napięcia”.

Oprócz naprężeń, pochodzących od pola elektrycznego, w dielektrykach stałych występują jeszcze naprężenia, pochodzące od prądu, przepływającego przez dielektryk, oraz od histerezy dielektrycznej. Są to naprężenia termiczne, gdyż skutkiem powyższych zjawisk jest nagrzewanie dielektryku. Dielektryki stałe, które mają przeważnie ujemny współczynnik cieplny oporności, zmniejszają oporność pod wpływem ciepła, co powoduje wzrost prądu i t. d., aż wreszcie ogrzanie może dojść do takiego stopnia, że nastąpi rozerwanie spoiwości cząsteczek i wcześ-

niejsze przebicie elektryczne. Na te zjawiska zaczyna w ostatnich czasach zwracać coraz większą uwagę, tłumacząc w ten sposób wiele zjawisk z wytrzymałości materiałów izolacyjnych stałych. Zajmiemy się nimi później przy omawianiu własności tych materiałów.

Wytrzymałość. — Wytrzymałość elektryczna materiałów izolacyjnych (dielektryków) jest określona wielkością napięcia, przy którym następuje gwałtowne zniszczenie spistości cząsteczek materiału, ujawniające się np. w postaci kanału przewodzącego, umożliwiającego zupełne wyładowanie elektryczne. Jest to t. zw. wytrzymałość na przebicie dielektryku iskrą elektryczną. W przeciwieństwie do wytrzymałości mechanicznej, nie jest ona wielkością stałą dla każdego materiału, ponieważ nie jest proporcjonalna ani do natężenia pola, ani do napięcia przyłożonego, ani też do grubości. Można ją tylko wyrazić w postaci charakterystyki, jako napięcie, przy którym następuje przebicie, w funkcji grubości. Orjentacyjnie można wytrzymałość podawać w woltach na 1 cm lub 1 mm; rozumieć przez to należy liczbę woltów, przy której następuje przebicie 1 cm wzgl. 1 mm dielektryku, lecz nie iloraz napięcia w woltach przez grubość płytki badanej w cm.

Dlatego też, określając wytrzymałość, racjonalniej jest mówić o naprężeniu, przy którym następuje przebicie, czyli o t. zw. naprężeniu krytycznym danego materiału lub też układu izolacyjnego, jeżeli się ma do czynienia z gotowymi układami dielektrycznymi, izolacyjnymi (izolatory, kable i t. p.). Przebieg naprężenia krytycznego w funkcji odległości elektrod jest dla każdego dielektryku charakterystyczną wielkością. Przebieg ten jest prawie zawsze tego rodzaju, że im bardziej grubość dielektryku rośnie, tem naprężenie krytyczne więcej maleje (asymptotycznie).

Wytrzymałość dielektryku zależy w dużym stopniu od kształtu pola naprężającego, oraz od jednolitości struktury dielektryku, od temperatury, wilgotności, ciśnienia i t. p.

Obliczanie naprężeń elektrycznych. — Z natężeniem pola elektrycznego F związane jest przesunięcie dielektryczne D . Według praw elektrostatyki w dielektryku o stałej dielektrycznej ϵ natężenie pola jest określone zmianą potencjału V w kierunku x i związane z przesunięciem równaniem:

$$F = - \frac{dV}{dx} = \frac{1}{\epsilon} 4\pi D \cdot 9 \cdot 10^{11} \text{ woltów/cm, } \dots (1)$$

które stanowi wzór zasadniczy przy obliczaniu naprężeń elektrycznych. Musimy zatem znać przesunięcie D , jakie się odbywa w rurkach indukcji w dielektryku. Ponieważ przesunięcie jest określone ładunkiem (Q), jaki się przesunie przez rurkę (o przekroju s), $D = \frac{dQ}{ds}$, przeto

$$F = \frac{1}{\epsilon} 4\pi Q \cdot 9 \cdot 10^{11} \dots (1 a)$$

$$\int ds$$

Przesunięcie to łatwo można wyznaczyć w przypadku, gdy linje pola elektrycznego mają kształt prostolinijny (rurki indukcji proste). Zachodzi to w układach izolacyjnych, stanowiących kondensatory

foremne. W elektrotechnice dążymy właśnie do nadania tym układom takich form, aby je można było traktować jako kondensatory płaskie, kuliste lub cylindryczne. Rozkład natężeń pola (a więc i naprężeń elektrycznych) i potencjału w takich układach jest bardzo łatwo wyznaczalny i znany z nauki o elektrostatyce. Z praw tam znalezionych dadzą się wyprowadzić ważne wnioski co do konstrukcji urządzeń o wysokim napięciu. — W następstwie, po kolei przejdziemy te najważniejsze formy układów izolacyjnych.

Posługiwanie się przesunięciami przy obliczaniu naprężeń jest nader niedogodne. Możemy jednak tego uniknąć przez wprowadzenie pojemności układu, co dla układów kondensatorowych prostych jest łatwe, ponieważ u nich obliczenia pojemności i naprężenia maksymalnego są ściśle ze sobą związane.

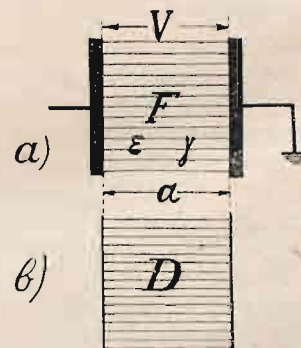
We wzorze $F = - \frac{dV}{dx}$, można V uważać jako wartość potencjału jednej okładziny, gdy druga jest uziemiona, albo jako różnicę potencjałów między dwiema okładzinami kondensatora. Ponieważ zaś $V = Q/C$, przeto natężenie w kierunku x , prostopadłym do powierzchni ekwipotencjalnych:

$$F = - Q \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{C} \right) \dots (1 b)$$

Z tego wzoru można zatem obliczyć naprężenia dielektryku, — miarodajne przy obliczaniu naprężeń na przebicie, — w tych miejscach, w których kierunek x zgadza się z kierunkiem linii pola, jak to np. wypada w układach wyżej opisanych, gdzie wielkości V są mierzone wzdłuż linii pola.

2. Układy płaskie.

Najprostszyp przypadkiem układu dielektrycznego w polu elektrycznym prostolinijnym przedstawia kondensator płaski (Rys. 1) z dielektrykiem ideal-



Rys. 1.

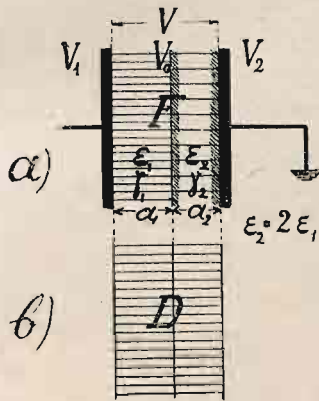
nym o jednolitej strukturze, t. j. mający wszędzie tę samą dielektryczną ϵ i tę samą przewodność właściwą γ , powierzchnię okładziny s , poddany działaniu napięcia V . Wiadomo, że w takim kondensatorze natężenie pola F między okładzinami jest jednostajne (pomijając brzegi okładzin) i określone wielkością przyłożonego napięcia i grubością dielektryku, a niezależne od stałej dielektrycznej,

$$F = \frac{V}{a} \dots (2)$$

W polu jednostajnym naprężenie jest przeto w każdym punkcie jednakowe. Jest to okoliczność bardzo ważna dla konstrukcji urządzeń izolacyjnych.

Dielektryk pojedynczy—jednolity w znaczeniu podanem powyżej, t. zn. z jednego materiału, przychodzi w konstrukcjach elektrycznych stosunkowo rzadko. Przeważnie mamy do czynienia z różnymi dielektrykami, rozmaicie ułożonemi obok siebie,—płaszczyzny rozdziału mają różne położenie względem kierunku pola elektrycznego. Dielektryk tego rodzaju nazywamy złożonym albo uwarstwionym. Często na oko wydaje się, że mamy jeden dielektryk, w rzeczywistości jednak wystąpi tam jeszcze inny w postaci nieprzewidzianej (np. warstwy powietrza między elektrodami a dielektrykiem, bańki powietrzne w masach izolacyjnych i t. p.); ma to duży wpływ na rozkład naprężeń.

Dielektryki uwarstwione prostopadle do pola. — Rozważymy dielektryk, złożony z warstw o różnych ϵ i γ . Najprostszym przypadkiem będzie układ dwóch dielektryków, tworzących kondensator płaski (Rys 2a). Weźmiemy narazie die-



Rys 2.

lektryk bez przewodności ($\gamma = 0$). Napięcie przyłożone $V = V_1 - V_2$ rozkłada się na $V_1 - V_0$ na pierwszym dielektryku i $V_0 - V_2$ na drugim. Przesunięcie dielektryczne D , które jest związane z ładunkami na okładzinach, będzie w obu dielektrykach to samo, (Rys. 2b) bo te same ładunki przesuwają się wzdłuż rurek

$$D_1 = D_2 = \frac{\epsilon_1 F_1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^{11}} = \frac{\epsilon_2 F_2}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^{11}} = D$$

Natomiast natężenia pola będą inne (Rys. 2a), bo zależą od napięć elektrycznych na dielektrykach, a mianowicie:

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \frac{V_1 - V_0}{a_1} = \frac{4\pi}{\epsilon_1} D \cdot 9 \cdot 10^{11} \\ F_2 &= \frac{V_0 - V_2}{a_2} = \frac{4\pi}{\epsilon_2} D \cdot 9 \cdot 10^{11} \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

Stąd wynika:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \dots \dots \dots (4)$$

w dielektrykach uwarstwionych prostopadle do pola, naprężenia są odwrot-

nie proporcjonalne do stałych dielektrycznych.

Suma napięć na poszczególnych dielektrykach (według wzoru 3).

$$V = F_1 a_1 + F_2 a_2,$$

albo uwzględniając wzór (4):

$$V = (a_1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} a_2) F_1, \text{ podobnie } V = (\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} a_1 + a_2) F_2$$

Z tego znajdziemy naprężenia w poszczególnych dielektrykach.

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \frac{V}{a_1 + a_2 \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}} = \frac{\epsilon_2 V}{\epsilon_2 a_1 + \epsilon_1 a_2} \\ F_2 &= \frac{V}{a_1 \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} + a_2} = \frac{\epsilon_1 V}{\epsilon_2 a_1 + \epsilon_1 a_2} \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

Widać z tego, że na rozkład naprężeń ma bardzo duży wpływ stała dielektryczna. W razie, gdy $\epsilon_1 = \epsilon_2$, $F_1 = F_2 = \frac{V}{a_1 + a_2}$,

to samo naprężenie panuje w całym dielektryku; zależy ono wtedy tylko od przyłożonego napięcia i grubości dielektryku, a nie zależy od stałej dielektrycznej, a więc tak, jak przy dielektryku jednolitym. Im większa różnica w stałych ϵ , tem bardziej nierównomierny rozkład napięć.

Przykład. Powietrze ($\epsilon_1 = 1$) wytrzyma ok. 21 kV/cm a zatem warstwa grubości $a_1 = 1$ cm pod napięciem 20 kV wprawdzie nie zostanie przebita, lecz będzie prawie na granicy wytrzymałości. Jeżeli, celem wzmocnienia wytrzymałości układu, spróbujemy wstawić płytkę porcelanową ($\epsilon_2 = 5$) grubości $a_2 = 0,2$ cm, (porcelana wytrzyma ok 100 kV/cm, a zatem płytka grubości 0,2 cm wytrzymałaby sama całe napięcie przyłożone), to naprężenia wtedy wypadną następujące: na warstwie powietrza grubości 0,8 cm $F_1 = \frac{20 \cdot 5}{0,8 \cdot 5 + 1 \cdot 0,2} = \infty 24,8$ kV/cm, a więc powyżej naprężenia krytycznego, w warstwie zaś porcelany będzie $F_2 = \frac{20 \cdot 1}{5 \cdot 0,8 + 1 \cdot 0,2} = \infty 4,76$ kV/cm

warstwa powietrzna zostanie przebita. Układ izolacyjny zatem w rezultacie pogorszył się.

Jakkolwiek w pewnych razach układ szeregowy dielektryków jest niepożądany, bo sprawia nadmierne naprężenia w niektórych warstwach, to nie znaczy to, aby go z reguły unikać. W niektórych przypadkach—jak to później omówimy, może być on z powodzeniem zastosowany (osłona dielektryczna).

Rozważymy teraz dielektryki z przewodnością, zakładając, że ich przewodności właściwe są różne. Gęstość prądu w polu jednostajnym można wyrazić iloczynem z natężenia pola przez przewodność właściwą, gęstość ta musi być ta sama w obu dielektrykach: $J = \gamma_1 F_1 = \gamma_2 F_2$, skąd:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \dots \dots \dots (6)$$

jak poprzednio przy stałych dielektrycznych, przeto jak tam:

$$F_1 = \frac{\gamma_2 V}{\gamma_2 a_1 + \gamma_1 a_2}, \text{ a } F_2 = \frac{\gamma_1 V}{\gamma_2 a_1 + \gamma_1 a_2}.$$

Przez podstawienie do wzoru na J wartości na F_1 i F_2 otrzymamy w obu razach:

$$J = \frac{\gamma_1 \gamma_2 V}{\gamma_2 a_1 + \gamma_1 a_2}$$

Przesunięcia zaś będą:

$$D_1 = \frac{\epsilon_1 F}{4 \pi \cdot 9 \cdot 10^{11}} = \frac{\epsilon_1 \gamma_2 V}{4 \pi (\gamma_2 a_1 + \gamma_1 a_2) \cdot 9 \cdot 10^{11}},$$

$$D_2 = \frac{\epsilon_2 F}{4 \pi \cdot 9 \cdot 10^{11}} = \frac{\epsilon_2 \gamma_1 V}{4 \pi (\gamma_2 a_1 + \gamma_1 a_2) \cdot 9 \cdot 10^{11}},$$

skąd:
$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{\epsilon_1 \gamma_1}{\epsilon_2 \gamma_2} \dots \dots \dots (7)$$

Tu więc przesunięcia nie są jednakowe, jak to mamy wtedy, gdy $\gamma = 0$. (Rys. 1 b.) Przesunięcia związane są z ładunkami, przeto ładunki będą w obu dielektrykach inne, różnica ładunków znajduje się na powierzchni zetknięcia obu dielektryków. Rachunek wskazuje, że ładunek jest teraz większy, niż przy przewodności $= 0$ (w stanie początkowym); tu leży źródło strat. Zjawisko to nie występuje, jeżeli $\frac{\epsilon_1}{\gamma_1} = \frac{\epsilon_2}{\gamma_2}$.

Im różnica przewodności dielektryków jest większa, tem większa różnica ładunków. Jeżeli jeden z nich ma przewodność stosunkowo bardzo dużą, to powierzchnia zetknięcia obu dielektryków przyjmuje powoli prawie cały ładunek dielektryku o większej przewodności. Będzie to miało taki skutek, jakby grubość całego dielektryku zmniejszyła się o grubość dielektryku o większej przewodności. Przez to różnica potencjałów przypada teraz na mniejszą grubość, a więc naprężenie dielektryka o mniejszej przewodności będzie większe.

Skutkiem tego pozornego zmniejszania się grubości dielektryku, pojemność układu (pozornie) wzrośnie. Wykazuje to praktyka przy mierzeniu pojemności kondensatora. Mierzac pojemność bezpośrednio po przyłożeniu napięcia, otrzymamy mniejszą pojemność, niż wykonywując pomiar później, pozostawwszy uprzednio kondensator przez dłuższy czas pod napięciem. Żeby uniknąć tego niepożądanego zjawiska, należy więc dążyć do zachowania równości stosunku stałych dielektrycznych i przewodności właściwych:

$$\frac{\epsilon_1}{\gamma_1} = \frac{\epsilon_2}{\gamma_2} \text{ czyli } \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}$$

Dielektryki, uwarstwione równolegle do pola.—Zupełnie inaczej zachowują się dielektryki, mające warstwy ułożone równoległe do kierunku pola elektrycznego (Rys. 3). Przyjmijmy, że okładziny są równoległe do siebie, a powierzchnie zetknięcia różnych dielektryków prostopadłe do nich. Wtedy pole przebiega w każdym dielektryku równoległe do płaszczyzny zetknięcia. Jasne jest, że naprężenia w dielektrykach, zależne tylko od napięcia przyłożonego i grubości dielektryków, będą jednakowe (Rys. 3 a):

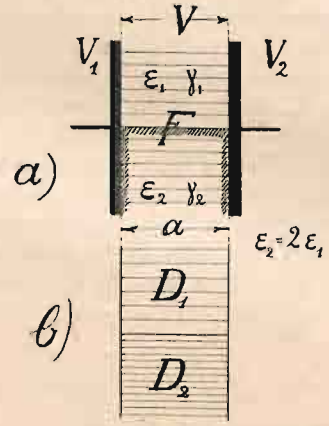
$$F_1 = F_2 = \frac{V_1 - V_2}{a} = \frac{V}{a} = F$$

Natomiast przesunięcia będą różne (Rys. 3 b.):

$$D_1 = \frac{\epsilon_1 F}{4 \pi \cdot 9 \cdot 10^{11}}, \text{ a } D_2 = \frac{\epsilon_2 F}{4 \pi \cdot 9 \cdot 10^{11}},$$

zatem
$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \dots \dots \dots (8)$$

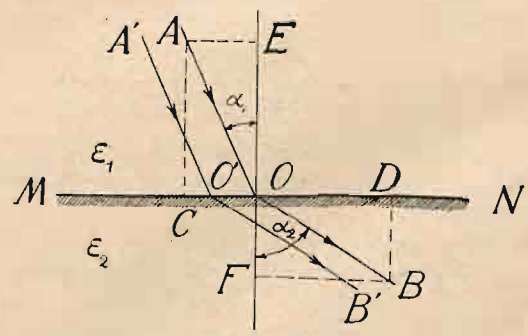
przesunięcia w dielektrykach uwarstwionych równoległe do pola są więc wprost proporcjonalne do stałych dielektrycznych.



Rys. 3.

Układ taki jest wprowadzie równomiernie naprężany (to zależy od F), jednak wytrzymałość jego jest określona wytrzymałością materiału gorszego. Tem się tłumaczy naprzykład, że wytrzymałość impregnowanego papieru uwarstwowionego jest większa przy naprężeniu prostopadłym do warstw, niż przy równoległym, bo masa impregnacyjna ma zazwyczaj mniejszą wytrzymałość.

Dielektryki, uwarstwione ukośnie do pola — Jeżeli linie pola elektrycznego skierowane są do płaszczyzny zetknięcia dwóch dielektryków nie prostopadłe, lub równoległe, jak w poprzednich przypadkach, lecz ukośnie, to zachowują się one analogicznie do linii pola magnetycznego w ciałach paramagnetycznych. Jeżeli AO i $A'O'$ (Rys. 4)



Rys. 4.

przedstawiają linje natężenia pola F_1 , względnie tworzą rurki, przez które następuje przesunięcie D , a α_1 oznacza kąt padania tych linii na powierzchnię zetknięcia (MN) dielektryków ϵ_1 i ϵ_2 , w których $\epsilon_2 > \epsilon_1$, to mamy załamanie linii (względnie rurek)

pola wzdłuż $OB, O'B'$... pod kątem $\alpha_2 > \alpha_1$. Wtedy według praw załamania:

$$\begin{array}{l} \text{natężenia} \\ \text{przesunięcia} \\ \text{naprężenia (wedł. 1)} \\ \text{stałe dielektr.} \end{array} \quad \begin{array}{l} F_1 : F_2 = \sin \alpha_2 : \sin \alpha_1 \\ D_1 : D_2 = \cos \alpha_2 : \cos \alpha_1 \\ F_1 : F_2 = \varepsilon_2 \cos \alpha_2 : \varepsilon_1 \cos \alpha_1 \\ \varepsilon_1 : \varepsilon_2 = \operatorname{tg} \alpha_1 : \operatorname{tg} \alpha_2. \end{array}$$

Naprężenia są tu inne, niż w przypadku ułożenia prostopadłego warstw do linii pola; są one zależne nie tylko od stałych dielektrycznych i grubości dielektryków, ale i od kąta linii względem powierzchni uwarstwienia.

Naprężenia można tu rozłożyć na składowe: prostopadłe do MN (OE), które, jak to wynika z powyższego, będą właściwie napręzać dielektryk na przebicie, i styczne do jego powierzchni ($OC \neq OD$), naprężające go w kierunku do tamtego prostopadłym. Te ostatnie naprężenia są np. przyczyną wyładowań powierzchniowych, o których później będzie mowa (naprężenie izolatorów na przeskok).

Powyższe prawa rozdziału naprężeń w dielektrykach złożonych tłumaczą wiele zjawisk, występujących przy wysokim napięciu i określają prawidłą konstrukcyjne dla przyrządów, maszyn i t. d., pracujących pod wysokim napięciem. Nie można jednak podać tu jakiegoś jednego wzoru, trzeba od przypadku do przypadku konstrukcję obliczyć, czy wytrzyma występujące naprężenie. Naogół jest dążność do wyboru takich materiałów, aby otrzymać równomierne naprężenia w całej konstrukcji.

Można jednak wyzyskać zjawisko nierównomiernego rozkładu naprężeń w celu osłony dielektrycznej. Powstanie ona np., jeżeli tak dobierzemy ε_1 i ε_2 oraz γ_1 i γ_2 , aby był zachowany dokładnie lub przynajmniej w przybliżeniu stosunek

$$\frac{\varepsilon_1}{\gamma_2} = \frac{\varepsilon_2}{\gamma_1}, \text{ a nadto, aby osłona była z materiału, utrud-$$

niającego jonizację, która zmniejsza izolacyjność. Wtedy warstwa druga jest częściowo osłaniana. Jeszcze lepsze wyniki osiąga się przez zastosowanie podwójnej osłony z obu stron warstwy osłanianej. Taką osłonę stanowią płyty albo rury z papieru impregnowanego, w stosunku do warstwy powietrza, która jest właściwą izolacją. Tu są możliwe różne kombinacje, o których później będzie jeszcze mowa. Wogóle stwierdzić można, że za pomocą kombinacji dielektryków można osiągnąć zarówno wyrównanie naprężeń, jak też i wywołać naprężenia nierównomierne.

W praktyce jednak prawie że nie mamy do czynienia z polami jednostajnymi, natomiast przeważnie występują pola niejednostajne, powstające głównie skutkiem niepłaskiego kształtu elektrod, a także wskutek znajdujących się obok siebie dielektryków o różnych własnościach, czy też z innego powodu. Nawet rzadko kiedy udaje się otrzymać pole jednostajne; zwykle będzie ono więcej lub mniej niekształcone. Naprężenia dielektryków, znajdujących się w takich polach, są inne, niż w polu jednostajnym; dielektryk jest wtedy naogół naprężany bardziej niekorzystnie. W praktyce elektrotechnicznej mamy jednak przeważnie układy mniej lub więcej foremne i to takie, które można sprowadzić do postaci geometrycznie prostej, całkowicie lub częściowo.

Pole elektryczne w takich układach jest prostolinijne, a naprężenia dadzą się łatwo obliczyć; z tych obliczeń można wyciągnąć wniosek co do naprężeń w układach rzeczywistych mniej foremnych.

Układy rozważane mają zwykle dwie elektrody, między którymi tworzy się pole elektryczne, przedewszystkiem zależne od ich kształtu. Często można te elektrody przyjąć za okładziny kondensatora. Jeżeli kształt ich jest geometrycznie prosty, to łatwo obliczyć pojemność takiego układu, (izolatory przepustowe, kable, przewody).

(Dok. nast.)

Błędne połączenia liczników trójfazowych na wysokie napięcie.

Inż.-elektr. L. Faterson. †

Do druku przygotował i w uwagi zaopatrzył inż.-elektr. Bolesław Jabłoński.

1. Wstęp. Nowoczesne liczniki trójfazowe niskiego napięcia, bezpośrednio włączane do sieci, wykonywane są w ten sposób, że błędne przyłączenie jest niemożliwe, o ile tylko posiadają one ściśle zaznaczone zaciski, do których należy doprowadzić przewody dopływowe (sieć) oraz odpływowe (instalacja) ¹⁾.

Ze względu na coraz większe rozpowszechnienie silników asynchronicznych o małych mocach, ta zaleta licznika, to znaczy pewność jego prawidłowego włączenia bez możliwości popełnienia błędu, jest rzeczą pierwszorzędną wagi dla każdej elektrowni ze względu na jej rentowność. Łatwość połączenia licznika obecnie posunięta została do tego stopnia, że praca jego jest niezależna od kolejności przyłączenia faz przewodników dopływowych.

Połączenie liczników trójfazowych wysokiego napięcia jest o wiele trudniejsze, ponieważ są one przyłączane do sieci za pośrednictwem transformatorów prądowych i napięciowych i z powodu złożonego schematu połączeń bywają w praktyce przypadki błędnego połączenia licznika, powodujące duże straty dla dostawcy lub odbiorcy energii elektrycznej. Po wykryciu nieprawidłowego przyłączenia nasuwa się konieczność określenia strat, wynikłych wskutek błędu w przyłączeniu, i to ma ścisły związek z zagadnieniem, jak licznik przez czas nieprawidłowego połączenia pracował, co on w rzeczywistości wskazywał i jaki jest stosunek wskazań licznika do rzeczywistej ilości energii elektrycznej, zużytej przez odbiorcę. Zagadnienie to, ciekawe teoretycznie a praktycznie zasługujące na baczną uwagę ze strony elektrowni, nie zostało do tej pory gruntownie opracowane, ze względu na trudności jego teoretycznego ujęcia ²⁾.

¹⁾ Zaciski, do których należy doprowadzić sieć, w licznikach europejskich posiadają mostki napięciowe, łączące zaciski prądowe i napięciowe. — Zaciski, do których przyłączamy instalację, są zawsze pojedyncze. B. J.

²⁾ Artykuł pisany w roku 1913. Od roku 1913 w prasie polskiej, francuskiej, czeskiej, niemieckiej i innych ukazał się szereg prac wyczerpujących, poświęconych badaniu licznika wysokiego napięcia, błędnie połączonego. B. J.