

# SZIGETELT FÁZISVEZETŐJŰ SZABADVEZETÉK

GESZTI P. OTTÓ\*  
AZ MTA LEVELEZŐ TAGJA

és

PATKÓ JÁNOS

[Beérkezett 1971. július 5-én]

Szigetelt fázisvezetőjű nagyfeszültségű szabadvezetékek vizsgálatával kapcsolatban a laboratóriumi körülmények között vékony szigetelőréteg alkalmazása mind a koronajelenségeket, mind a kapcsolási túlfeszültségekkel szembeni hajlamot jelentősen javította. Elképzelhető, hogy egy megfelelő szigetelőanyag megtalálása esetén a gyakorlatban is jelentős műszaki és gazdasági előnyöket hozhat egy szigetelt fázisvezetőjű szabadvezeték.

## 1. Bevezetés

Nagyfeszültségű szabadvezetékek építésénél jelentős gondot okozna a fázisvezetők szigetelési problémái. Itt elsősorban a fázisvezetők levegő általa való szigetelésére gondolunk. Ez a szigetelés ui. stacioner üzemvitel esetében részlegesen letörhet, ami a koronajelenséget okozza.

Tranziens állapotban nagyfeszültségű vezetékekről lévén szó, itt meg kell említeni a kapcsolási túlfeszültségeket, amelyeknek hatására átütések következhetnek be a fázisvezető és a föld, és esetleg két fázisvezető között.

Kézenfekvő gondolat egy olyan megoldás megvizsgálása, amelynél a fázisvezetőkön vékony, sima felületű, öntisztító szigetelőréteg helyezkedik el amely még a vezeték termikus terhelhetőségét nem, vagy alig változtatja meg, és amely szigetelés viszont alkalmas lehet arra, hogy mind a koronajelenség, mind a kapcsolási túlfeszültség okozta átívelések tekintetében e jelenségeket kedvezően befolyásolja.

Elképzelésünk szerint ugyanis egy ilyen vékony, nem a teljes fázisfeszültségre, hanem annak csak töredékének szigetelésére alkalmas szigetelő rétegnek a hatása többek között abban kell hogy megmutatkozzék, hogy a váltakozó feszültség hatására a vezető közelében nem, vagy alig keletkezik tértöltés (normális körülmények között, stacioner folyamatoknál), kapcsolási túlfeszültségeknél pedig a levegőben való átütést akadályozza meg, ill. késlelteti. (Egy ilyen szigetelőréteg elképzelhető a szigetelőláncok végén levő szerelvényeken is.)

\* Prof. Dr. Geszti P. Ottó, Budapest XII., Jagelló u. 13.

Jelen tanulmányban — egyelőre laboratóriumi körülmények között — megvizsgáltuk, hogy szigetelt vezető esetén hogyan alakultak:

- a) a sugárzási jelenségek és
- b) a kapcsolási túlfeszültségekkel kapcsolatos átütések.

Tudatában vagyunk annak, hogy a laboratóriumi kísérletsorozat kedvező eredmények esetében sem feltétlenül konkluzív valóságos körülményekre. Meggyőződésünk szerint még ebben az esetben is hosszadalmas kutatómunkára van szükség abban a vonatkozásban, hogy egy szigetelt fázisvezetőjű rendszer hogyan viselkedik szennyezett körülmények között, különböző fajta csapadékok esetében és természetesen egy olyan műanyag szigetelés kikísérletezését is igényli, amelyik szabadban, hosszú időn keresztül stabil és a különböző, szabadvezetékekkel kapcsolatos feltételeknek megfelel.

## 2. A sugárzás

120 kV és annál nagyobb névleges feszültségű távvezetékek tervezésének egyik fő szempontja a sugárzási veszteségek megfelelő figyelembevétele. Kedvezőtlen körülmények között a veszteségeken túlmenően jelentős lehet az akusztikai, valamint a rádióvételi zavarás is.

A sugárzási veszteségek megnövekedését a sugárzási küszöbfeszültség ( $U_k$ ) csökkenése okozza. Ez különösen akkor okozhat nagy zavarokat, ha a sugárzás küszöbfeszültsége a fázisfeszültség alá csökken. Az  $U_k$  sugárzási küszöbfeszültség többek között a vezetőre felvitt szigetelőbevonattal is növelhető.

Nagyfeszültségű távvezetékek vezetői az üzemi feszültségen már kis-mértékben sugároznak. A sugárzás intenzitása kedvezőtlen időjárási viszonyok esetében nagyobb, mint amit a sugárzási küszöbfeszültség csökkenése okoz.

A fentieket mérésekkel is megvizsgáltuk. A mérésekkel kapcsolatos néhány elméleti összefüggést a Függelékben adunk meg.

A méréseknél használt sodronyok adatai:

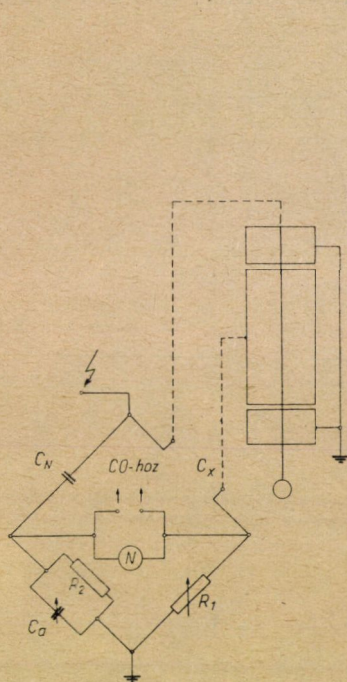
$D_{\text{csupas}}$	=	18 mm (átmérő)
$D_{\text{szig}}$	=	24 mm
$V_{\text{szig}}$	=	3 mm (szigetelőréteg vastagsága)
$d_{\text{elemi szál}}$	=	2,5 mm
$n_{\text{AC}}$	=	7 db
$n_{\text{AI}}$	=	30 db

A méréseket 3 különböző sodronyon végeztük el:

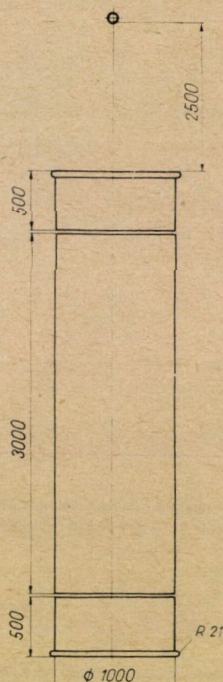
- a) csupas sodronyon;
- b) „F” jelű műanyag bevonattal ellátott sodronyon;
- c) „K” jelű műanyag bevonattal ellátott sodronyon.

Végeztünk továbbá összehasonlító méréseket csupasz, 240 mm<sup>2</sup>, 300 mm<sup>2</sup>, 600 mm<sup>2</sup> névleges keresztmetszetű sodronyokon, és 30 mm, továbbá 50 mm átmérőjű sima fémhengeren.

A sugárzási küszöb feszültség növekedését a veszteségi tényező (tan  $\delta$ ) feszültségfüggéséből határoztuk meg. A veszteségi tényezőt Schering-híddal



1. ábra. Schering-hidas mérés kapcsolási vázlata



2. ábra. A próbatest vázlata

mértük (1. ábra). (Ez a híd alkalmas a sugárzás megindulásának közvetlen kimutatására is.) A hídhoz egy oszcilloszkóppal csatlakoztunk; amelynek az ernyőjén közvetlenül látható volt a sugárzás megindulása. Az így meghatározható  $U_k$  minden esetben kisebb a tan  $\delta(U)$  görbékből meghatározható  $U_k$  értékeknél.

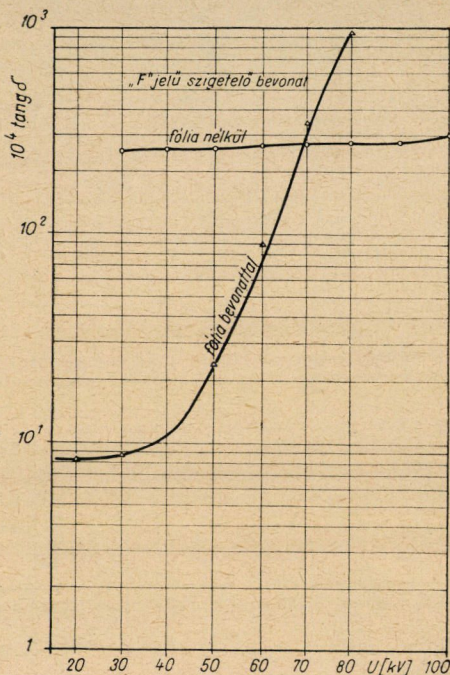
A veszteségi tényező mérésekhez egy alkalmas elektródaelrendezést kellett kialakítani. A 2. ábrán látható henger tengelyében helyeztük el a vizsgálandó sodronyt. A külső henger két vége a középső résztől el van szigetelve, s az 1. ábrán látható módon van bekötve.

A 3. ábrán látható az „F” jelű bevonattal ellátott kábel („b” mérés) mérési eredménye bevonva, ill. fémfóliával is bevonva. A fémfólia szerepe az

volt, hogy a sodronyátmérő növekedésének (műanyag helyett fém) a hatását demonstrálja.

A 4. ábrán az előbbihez hasonlóan a „K” jelű bevonattal ellátott kábel („c” mérés) mérési eredménye látható, ugyancsak fémfólia bevonattal és anélkül.

Az 5. ábrán együtt látható az „a”, „b” és „c”, vagyis a csupasz, az „F” jelű bevonattal és a „K” jelű bevonattal ellátott sodrony mérési eredménye.



3. ábra.  $\tan \delta (U)$ , „F” bevonat esetében 100 kV-ig mérve

Jól látható, hogy pl. 120 kV-os hálózat fázisfeszültségének környékén ( $120/\sqrt{3} \approx 70$  kV) a „b” és „c” bevonattal ellátott sodrony is kedvezőbb a csupasz sodronynál.

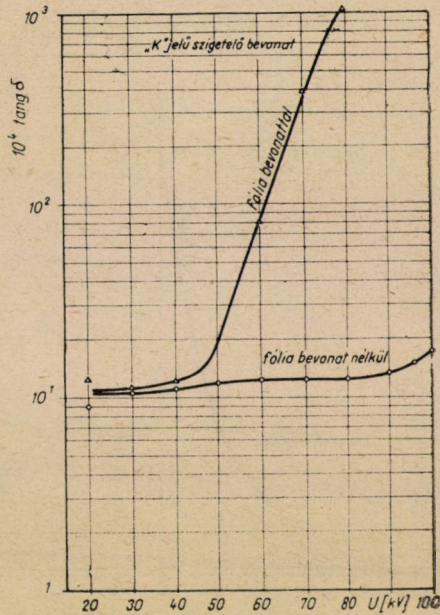
$$\tan \delta_a \approx 820$$

$$\tan \delta_b \approx 270$$

$$\tan \delta_c \approx 12,5$$

Ez azt jelenti, hogy a „c” esetben a „K” jelű bevonat alkalmazásával a veszteség kb.  $820/12,5 \approx 65$ -öd része a csupasz sodrony alkalmazásakor fel lépő koronaveszteségnek.

A bevonattal ellátott sodrony másik előnye, hogy míg a feszültség kismértékű növekedése esetében (10%) alig, vagy egyáltalán nem növekedik a veszteségi tényező, addig a csupasz sodrony koronavesztesége rohamosan nő.



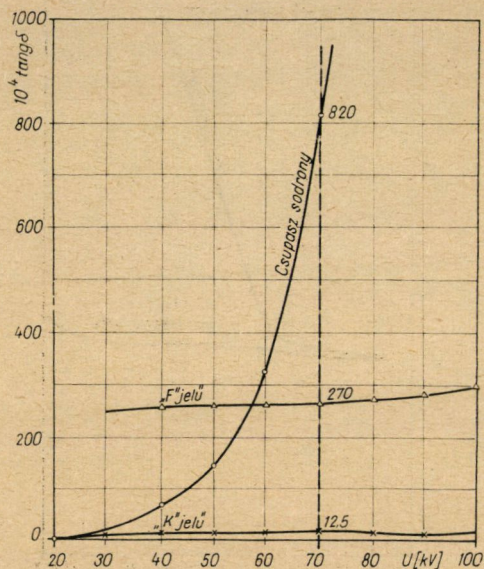
4. ábra.  $\tan \delta$  ( $U$ ), „K” bevonat esetében 100 kV-ig mérve

A műanyag bevonatú sodronyokat még bevontuk fémfóliával is. Ezzel azt akartuk demonstrálni, hogy egyedül a csupasz huzal átmérőjének növelésével is csökkenthető valamelyest az  $U_k$  feszültség. (A nem tökéletesen sima fémfóliafelület miatt ezek a görbék a „b” és „c” esetben csak tájékoztató jellegűek.)

A mérési eredmények egyértelműen azt mutatják, hogy a feszültségtartomány jelentős (és az alkalmazási zónába eső) részén a koronaveszteség (és a tértöltés is) egy nagyságrenddel, sőt ezt meghaladóan csökkenthető szigetelőréteggel. A szigetelőréteg e kedvező hatása csak egészen nagy feszültségeken vész el (amelyek már amúgy is az alkalmazási zónán kívül vannak).

A mérések azt is kimutatták, hogy a veszteségcsökkenés sokkal nagyobb, mint amit az átmérőnöveléssel és a felületi simasággal el lehet érni. A szigetelőréteg által — amely esetleg egy egészen vékony réteg is lehet — felvett százalékos nagyságrendű feszültség nem magyarázza a nagymértű javulást.

A veszteségsökkenés fő oka abban látjuk, hogy a szigetelőréteg, mely végtelen rezervoírnak tekinthető, nem teszi lehetővé elektronok kilépését a fémből, és így csak a radiális, igen csekély értékű szivárgási áramnak megfelelően alakulhatnak ki tértöltések, ill. a tértöltések kialakulása erősen fékeződik és gyengül.



5. ábra.  $\tan \delta (U)$ , csúpszás, „F'' és „K'' bevonat esetében 100 kV-ig mérve

### 3. Kapcsolási túlfeszültségek

Kísérletet végeztünk a fenti szigetelt sodronyokkal, ill. a fenti sodronyok külső átmérőivel azonos átmérőjű, két párhuzamos csúpszás csővel, melyeknek tengelytávolsága 190 cm volt. Az alkalmazott feszültség hullám 300/3000  $\mu$ sec pozitív polaritású volt. A mérések szerint a két csúpszás cső között az 50%-os átívelési feszültség kb. 1000 kV<sub>csucs</sub>-nak felelt meg, melyhez kb. 900 kV<sub>cs</sub> withstand voltage tartozott.

A mérések a szigetelt sodronyok esetében a következő eredményt adták. Három lökést 1200 kV<sub>cs</sub>-al minden további nélkül kibírt. 1300 kV<sub>cs</sub>-al két lökést bírt ki, a harmadikat nem. Így a withstand voltage 1200 kV<sub>cs</sub>-ra tehető és ezért a szigetelés okozta withstand voltage növekedés 300 kV<sub>cs</sub> mellett 33%-kal egyenértékű. Ilyen értelemben a kapcsolási túlfeszültségekkel szemben az ellenállóképesség jelentékeny javulását lehetett tapasztalni a 3 mm vastag szigetelőréteg jelenléte következtében.

## FÜGGELÉK

1. A mérésekkel kapcsolatos néhány elméleti összefüggést itt adunk meg.

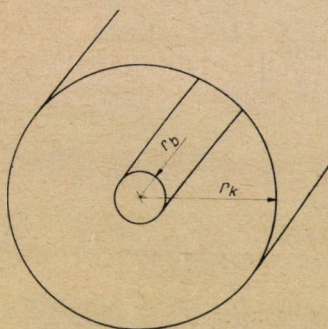
$$E_{\max} = fE_{\text{átl}} = \frac{1}{\eta} E_{\text{átl}},$$

ahol  $f > 1$ , az inhomogenitási tényező,  
 $\eta < 1$ , az ún. kihasználási tényező,

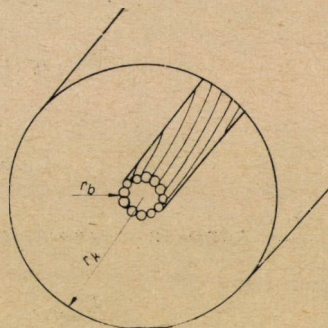
vagy pedig

$$E_{\max} = kU = \frac{U}{\alpha},$$

ahol  $k$  — geometriától függő jellemző,  
 $\alpha$  — az ún. virtuális elektródatávolság.



6. ábra. Koaxiális henger sima felületű vezetővel



7. ábra. Koaxiális henger sordonyvezetővel

A maximális térerősséget — mint a feszültség függvényét — két esetre határoztuk meg (az általunk használt sodronyon, ill. hengerre):

- a) a vezető felülete sima,
- b) a vezető elemi szálakból áll (sodrony).

Az egyik esetben — koaxiális hengerekről van szó — a belső elektróda legyen egy sima fémhenger (6. ábra), a második esetben pedig egy  $n = 37$  elemi szálból álló sodrony (7. ábra). A koaxiális henger geometriai adatai:

$$\begin{aligned} r_b &= 0,9 \text{ cm,} \\ r_k &= 50 \text{ cm,} \\ n^2 &= 37 \text{ (elemi szálak száma),} \\ n &= 18 \text{ (a külső koszorúban levő huzalok száma).} \end{aligned}$$

Az első esetben a térerősséget a következő összefüggés adja:

$$E_{\max} = \frac{U}{r_b \ln \frac{r_k}{r_b}} = \frac{1}{0,9 \ln \frac{50}{0,9}} U = 0,278 U.$$

A második esetben

$$E_{\max \text{ sodr}} = \frac{\lambda U}{r_b \left( n \ln \frac{r_k}{r_b} + \ln \frac{\lambda}{n} \right)},$$

ahol

$$\lambda = n \left( 1 + \frac{1}{n \sin \frac{\pi}{n}} \right) = 18 \left( 1 + \frac{1}{18 \sin \frac{\pi}{18}} \right) = 22,65.$$

Így

$$\begin{aligned} E_{\max \text{ sodr}} &= \frac{\lambda}{r_b \left( n \ln \frac{r_k}{r_b} + \ln \frac{\lambda}{n} \right)} U = \\ &= \frac{22,65}{0,9 \left( 18 \ln \frac{50}{0,9} + \ln \frac{22,65}{18} \right)} U, \end{aligned}$$

$$E_{\max \text{ sodr}} = 0,348 U.$$

A sodrony felületén a térerősség ebben az esetben

$$\frac{E_{\max \text{ sodr}}}{E_{\max}} = \frac{0,348 U}{0,278 U} = 1,25\text{-ször}$$

nagyobb.

Kiszámítottuk a levegőben a maximális térerősséget, ha az  $r_b$  sugarú vezetőt műanyag bevonattal vettük körül (8. ábra). A méretek a következők:

$$\begin{aligned} r_1 &= 0,9 \text{ cm} \\ r_2 &= 1,2 \text{ cm} \\ r_3 &= 50 \text{ cm.} \end{aligned}$$

Az  $r_2 - r_1$  helyen  $\varepsilon_1$ , az  $r_3 - r_2$  helyen  $\varepsilon_2$  permittivitású anyag van.

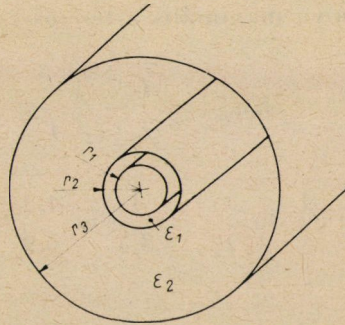
$$\varepsilon_1 = 3,5,$$

$$\varepsilon_2 = 1 \text{ (levegő)}.$$

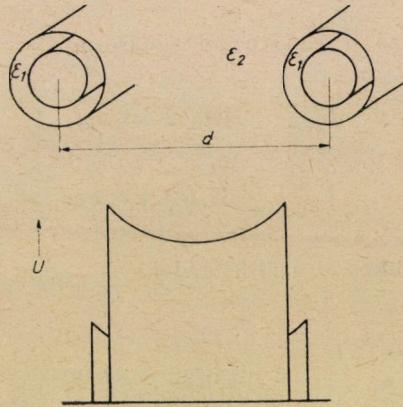
A szigetelőanyagban a maximális térerősség az  $r_1$  sugáron ébred:

$$E_{1 \max} = \frac{U}{r_1} \frac{1}{\varepsilon_1 \cdot A}.$$

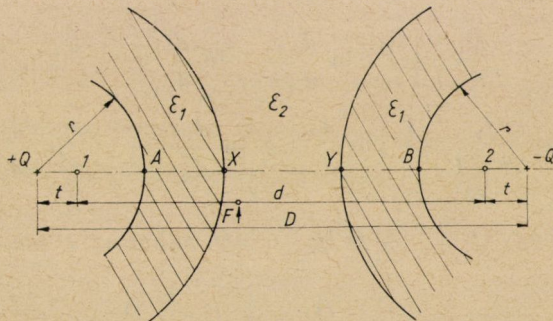




8. ábra. Koaxiális hengere rendezés rétegzett szigeteléssel



9. ábra. Egymást nem burkoló párhuzamos hengerek rétegzett szigeteléssel és a potenciál-eloszlás



10. ábra. Egymást nem burkoló hengerek, rétegzett szigeteléssel (nagyítás)

A levegőben az  $r_2$  sugáron maximális a térerősség:

$$E_{2\max} = \frac{U}{r_2} \cdot \frac{1}{\varepsilon_2 \cdot A},$$

ahol

$$A = \frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} = \frac{1}{3,5} \ln \frac{1,2}{0,9} + \frac{1}{1} \ln \frac{50}{1,2} = 3,8.$$

Ezek után

$$E_{1\max} = \frac{1}{r_1 \varepsilon_1 A} U = \frac{1}{0,9 \cdot 3,5 \cdot 3,8} U = 0,084 U,$$

$$E_{2\max} = \frac{1}{r_2 \varepsilon_2 A} U = \frac{1}{1,2 \cdot 1 \cdot 3,8} U = 0,22 U,$$

$r_1 = 0,9$  cm-hez tartozó levegőátütési szilárdság

$$E_{\text{üt } r_1} = 40/\sqrt{2} \text{ kV/cm},$$

$r_2 = 1,2$  cm-hez

$$E_{\text{üt } r_2} = 37/\sqrt{2} \text{ kV/cm}$$

érték tartozik. Számunkra ez utóbbi érdekes.

$$E_{2\max} = 0,22 U \rightarrow U = \frac{E_{\text{üt } r_2}}{0,22} = \frac{37}{0,22 \cdot \sqrt{2}} = 119 \text{ kV}.$$

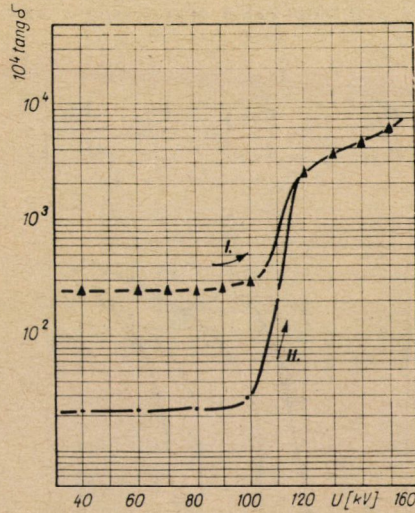
Ezen a feszültségen már letörnek a levegő villamos szilárdsága.

A valóságos viszonyokat nem a koaxiális hengerelrendezés közelíti meg legjobban, hanem a párhuzamos kis sugarú hengerek tere, ahol a vezetők műanyag bevonat van (9. és 10. ábra). Rétegzett szigetelők terén a feszültség:

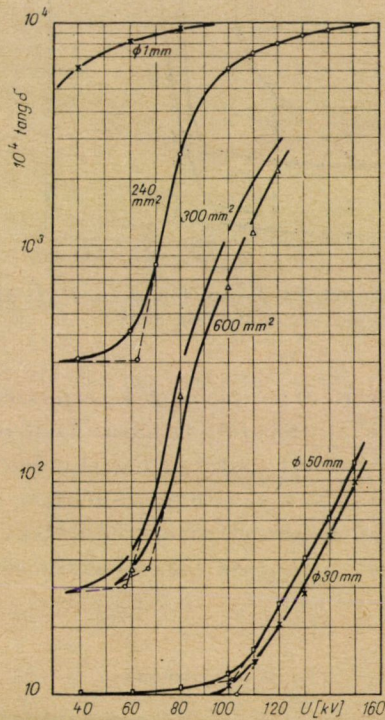
$$U_{AB} = \frac{Q_1}{2\pi \varepsilon_0 l} \left[ \frac{1}{\varepsilon_1} \left( \ln \frac{d_{X1}}{d_{A1}} + \ln \frac{d_{B1}}{d_{Y1}} \right) + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{d_{Y1}}{d_{X1}} \right] + \frac{Q_2}{2\pi \varepsilon_0 l} \left[ \frac{1}{\varepsilon_1} \left( \ln \frac{d_{A2}}{d_{X2}} + \ln \frac{d_{Y2}}{d_{B2}} \right) + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{d_{X2}}{d_{Y2}} \right].$$

Tételezzük fel, hogy  $Q_1 = +Q$  és  $Q_2 = -Q$ , akkor az  $F$  pont helyén a térerősség:

$$E_F = \frac{Q}{2\pi \varepsilon_F \varepsilon_0 l} \left( \frac{1}{d_{1F}} + \frac{1}{d_{2F}} \right).$$



11. ábra.  $\tan \delta (U)$ , „F” jelű sodrony 150 kV-ig mérve

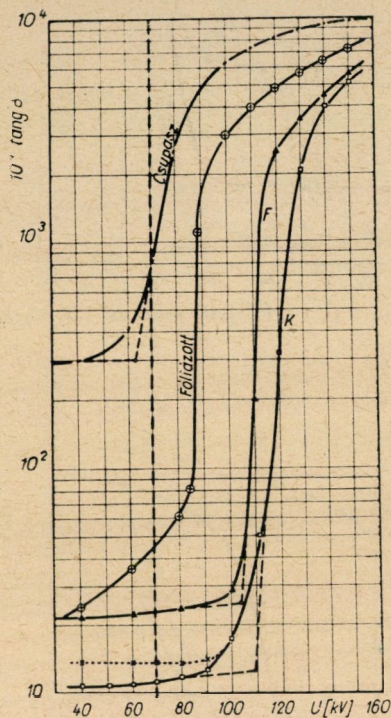


12. ábra.  $\tan \delta (U)$ , csupasz sodronyok és csövek 150 kV-ig mérve

Az előbbi két összefüggés segítségével a térerősséget az

$$E_F = U_{AB} \frac{1}{2 \frac{1}{\varepsilon_1} \left[ \left( \ln \frac{d_{X1}}{d_{A1}} + \ln \frac{d_{B1}}{d_{Y1}} \right) + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{d_{Y1}}{d_{X1}} \right]} \cdot \frac{1}{\varepsilon_F} \left( \frac{1}{d_{1F}} + \frac{1}{d_{2F}} \right)$$

összefüggés adja.



13. ábra.  $\tan \delta(U)$ , 240 mm<sup>2</sup> sodrony csúszáson, fóliázva, „F” és „K” jelű bevonattal ellátva, 150 kV-ig mérve

2. A teljesség kedvéért a méréseinket kiterjesztettük 150 kV-ig. A 11. ábrán az „F” bevonattal ellátott vezető látható. Az I. jelű görbe az első, a II. jelű a második mérési eredményt mutatja. Feltehetően olyan üregek lehetnek a műanyag szigetelésben, amelyek az első mérésnél még sugároztak, a második mérésnél már nem (az első mérésnél elmeredhetnek).

A 12. ábrán láthatók a csúszáson és csövek  $\tan \delta(U)$  görbéi, míg a 13. ábrán a 240 mm<sup>2</sup>-es sodrony  $\tan \delta(U)$  görbéi csúszáson és szigetelve.

#### Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki dr. BÁN Gábornak, aki a kapcsolási túlfeszültségekkel kapcsolatos méréseket végezte.

**Freileitungen mit isolierten Phasenleitern.** Im stationären Betrieb von Hochspannungs-Freileitungen kann die elektrische Festigkeit der Luft teilweise zusammenbrechen, was Corona-Erscheinungen verursacht; während transients Zustände, insbesondere unter der Wirkung von Schaltüberspannungen entstehen Überschläge zwischen Phasenleiter und Erde, eventuell zwischen Phasenleitern. Zwecks Beseitigung bzw. Reduzierung dieser Fehler schlagen die Verfasser vor, die Phasenleiter mit einer dünnen, glatten, selbstreinigenden Isolierschicht zu überziehen. Die thermische Belastbarkeit der Leitung ändert sich so nicht oder nur in unbedeutendem Maße. Die Meßergebnisse zeigen daß die kritische Spannung oder Strahlung (und auch der Coronalverlust) unter der Wirkung der die Oberfläche des Seils überziehenden Isolierschicht bedeutend abnehmen und daß auch die Widerstandsfähigkeit gegenüber den Schaltüberspannungen sich beträchtlich erhöht.

**Overhead Lines with Insulated Phase Conductors.** In the stationary operation of high-voltage overhead transmission lines, the dielectric strength of the air may break down partially causing thus corona effects; during transient states, short-circuits, mainly due to the switching overvoltages, may occur between a phase conductor and the earth or between phase conductors. For eliminating or reducing these effects the authors propose to coat the phase conductors with a thin, smooth, self-cleaning insulation layer. The thermal load capacity of the line would not change at all, or only insignificantly. The measuring results showed that the critical voltage (and the corona loss too) are considerably reduced by the insulating layer covering the surface of the cable, and the resistance to switching overvoltages is considerably improved as well.