

VIVEMA13

Váltakozó áramú rendszerek 0

3+0+0 f 4k

2016

készítette

**Dr BERTA István egyetemi tanár és
Dr SZEDENIK Norbert egyetemi docens**

**Dr HORVÁTH Tibor professzor emeritus és
KIMPIÁN Aladár egyetemi docens**
könyvei és előadásai felhasználásával

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamos Energetika Tanszék
Nagyfeszültségű Technika és Berendezések Csoport**

NF – 0 – 1 – 2 – 3

- 0 Az áramok háborúja (múlt – jelen – jövő)**
- 1 A villamos erőterek jellemzői. Energia és erőhatások villamos erőterekben. Feszültségeloszlás szigetelőkön. A váltakozó villamos terek analitikus és numerikus számítása.**
- 2 Villamos szigetelőanyagok változó erőterben. Vezetés és polarizáció, polarizáció spektrum. Szigetelésre kapcsolt váltakozó feszültség, vektorábrák, rétegezett szigetelések. A szigetelők villamos anyagjellemzői, azok frekvencia- és hőmérsékletfüggése. Villamos veszteségek (veszteségi tényező, dielektromos veszteségek).**
- 3 Váltakozó villamos erőterek előállítása és mérése. Kábelek és távvezetékek erőtere. Váltakozó feszültségű szigetelésvizsgálat. Feszültség-igénybevételek, próbafeszültségek.**

Az áramok háborúja

„The War of Currents”

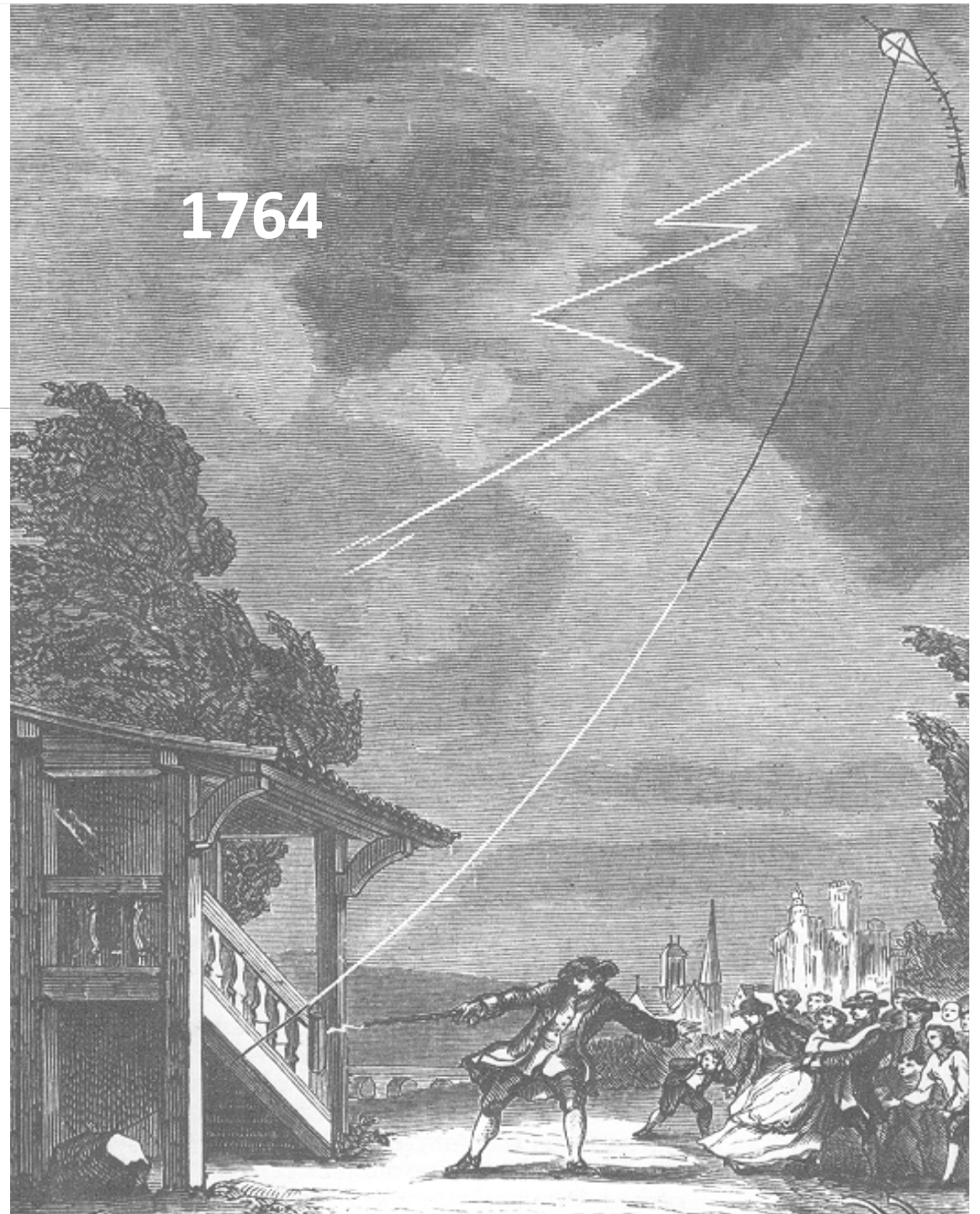


Milétozi Thalész

Kr. e. 624 körül – Kr. E. 546 körül
filozófus, természettudós, mérnök



1764



倒るゝと有べうら

焼酎を温めて
うくきを指し
火で焼く

鉄串長さ百尺末どがりて

新の

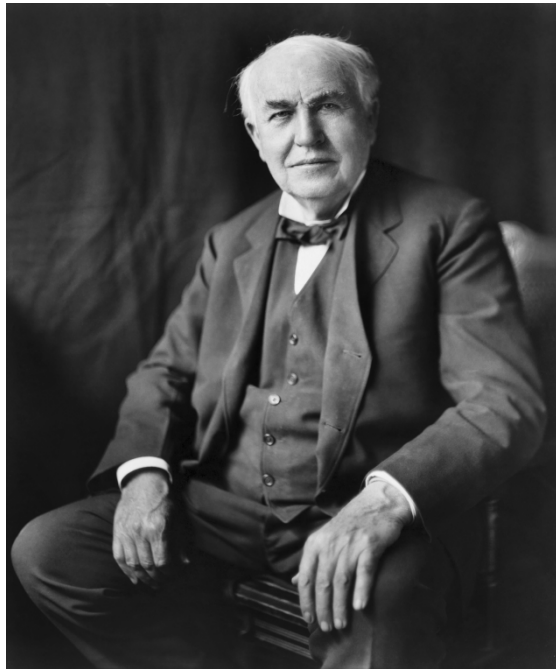


楯盤方尺
厚一寸五分

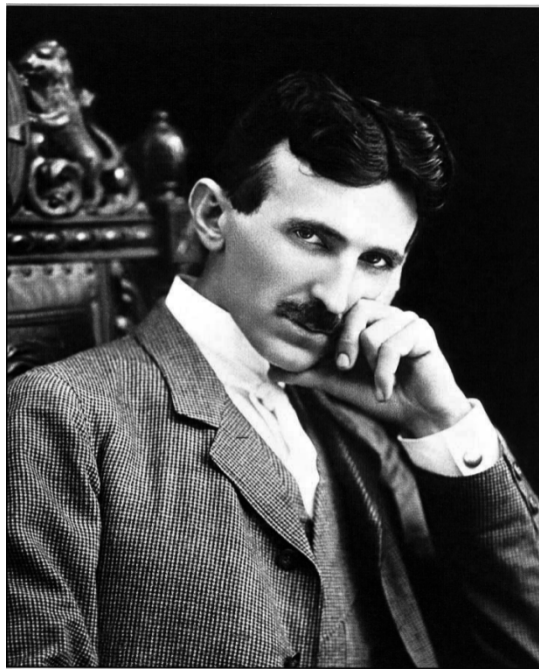
Tornádó és villám



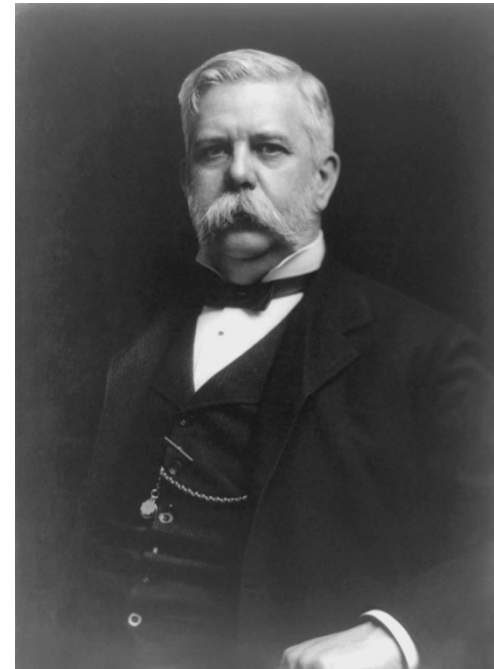
Thomas Alva **EDISON**



Nikola **TESLA**

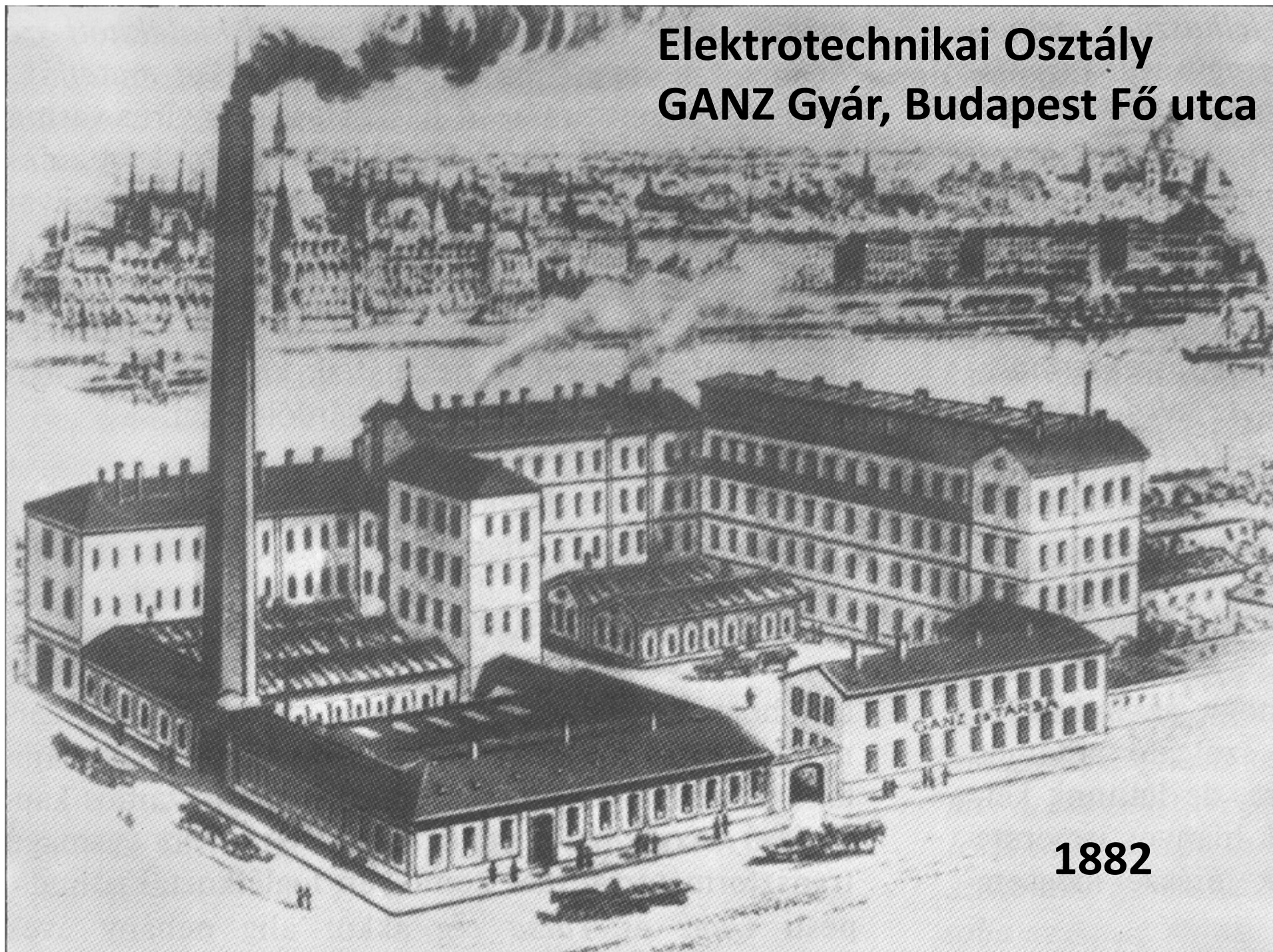


George
WESTINGHOUSE



Elektrotechnikai Osztály

GANZ Gyár, Budapest Fő utca



1882

MECHWART András
1834-1907
vezérigazgató
GANZ gyár, Budapest



ZIPERNOWSKY Károly
1853-1942

**A transzformátor
feltalálója**

**GANZ Gyár Budapest,
egyetemi tanár,
a Magyar
Elektrotechnikai
Egyesület elnöke**

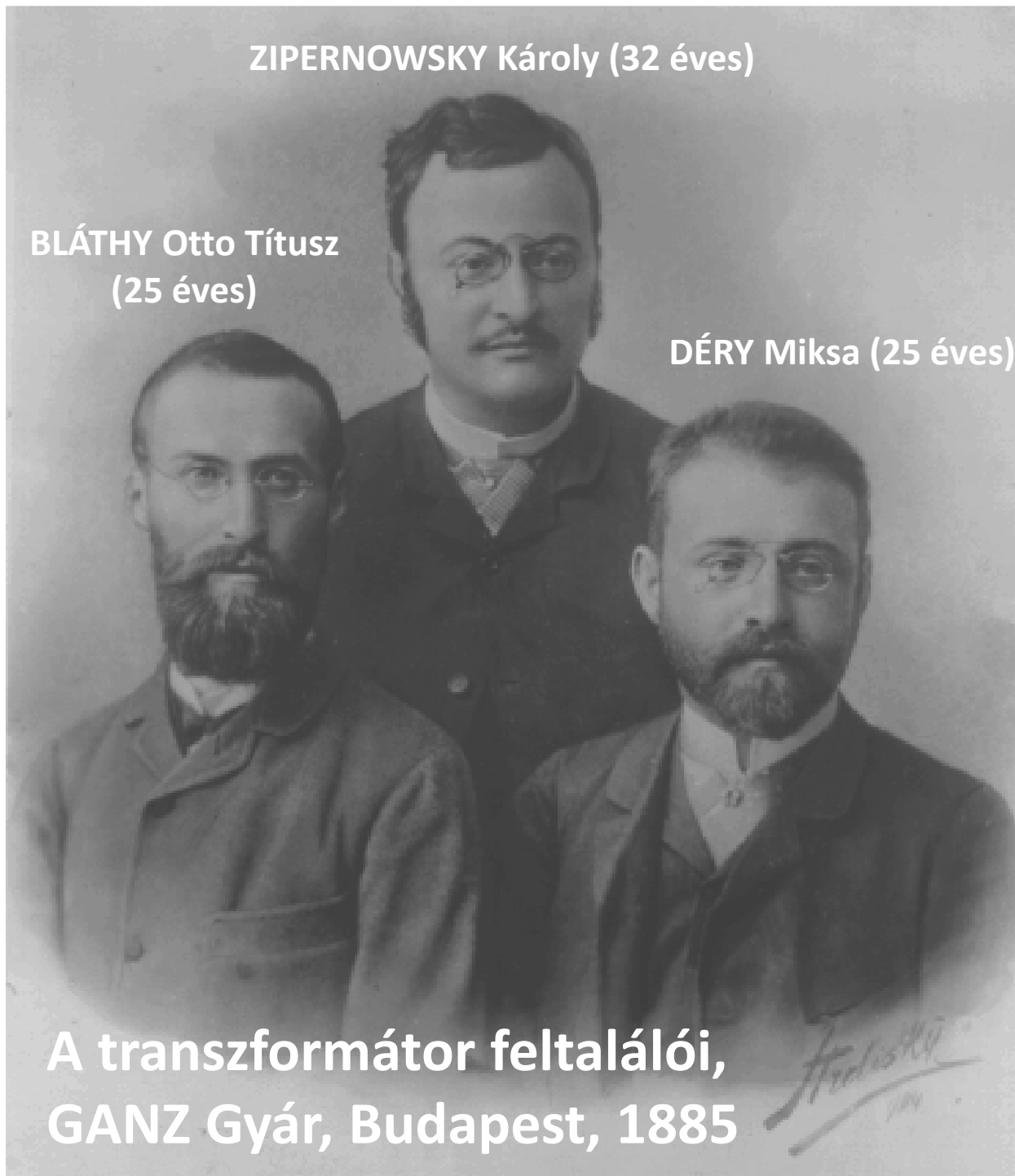


ZIPERNOWSKY Károly (32 éves)

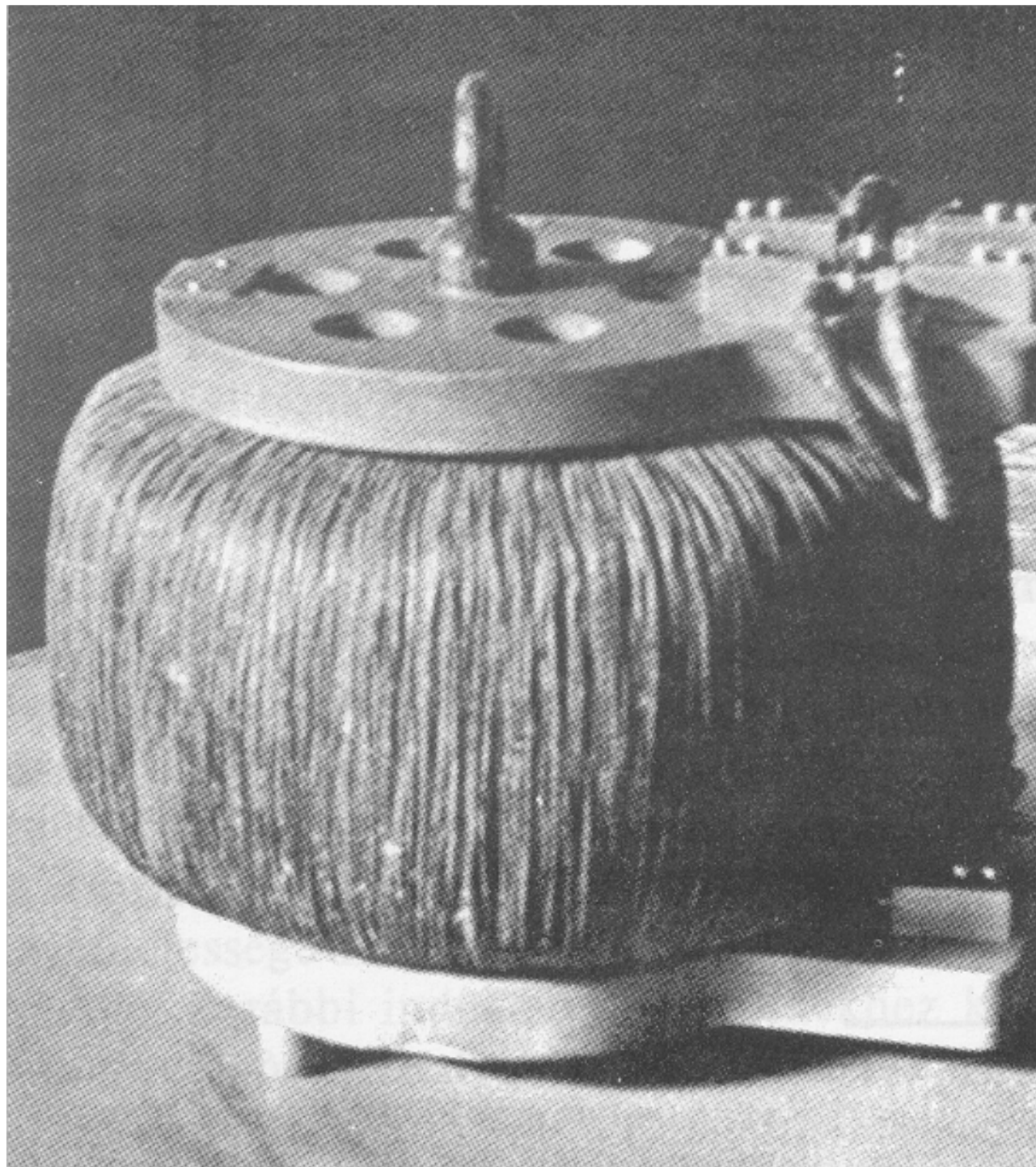
BLÁTHY Otto Títusz
(25 éves)

DÉRY Miksa (25 éves)

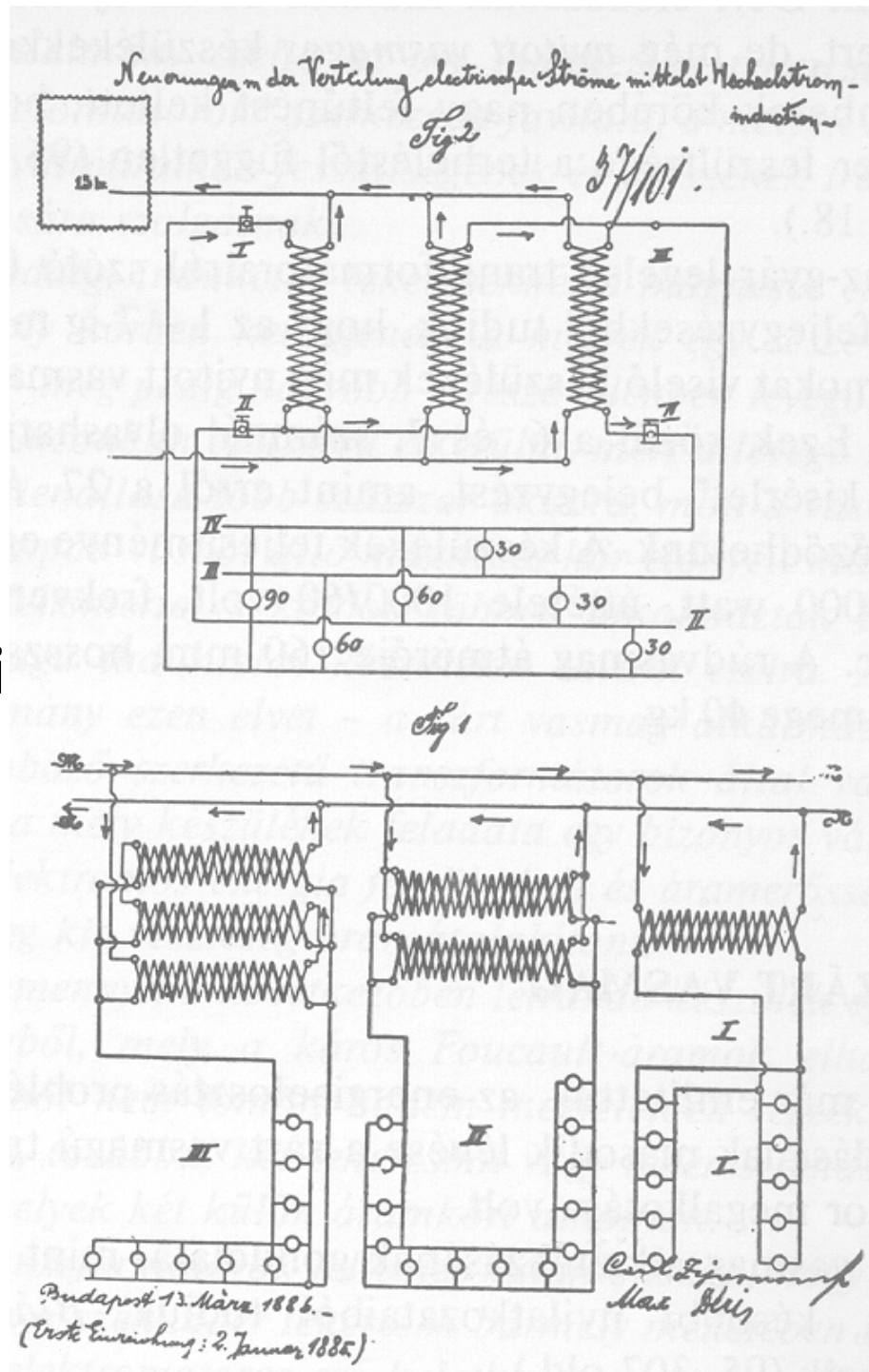
A transzformátor feltalálói,
GANZ Gyár, Budapest, 1885



**Az első köpeny
típusú
transzformátor,
GANZ Gyár,
Budapest, 1885**



**A párhuzamos
kapcsolás szabadalmi
bejelentése,
Budapest, 1885**

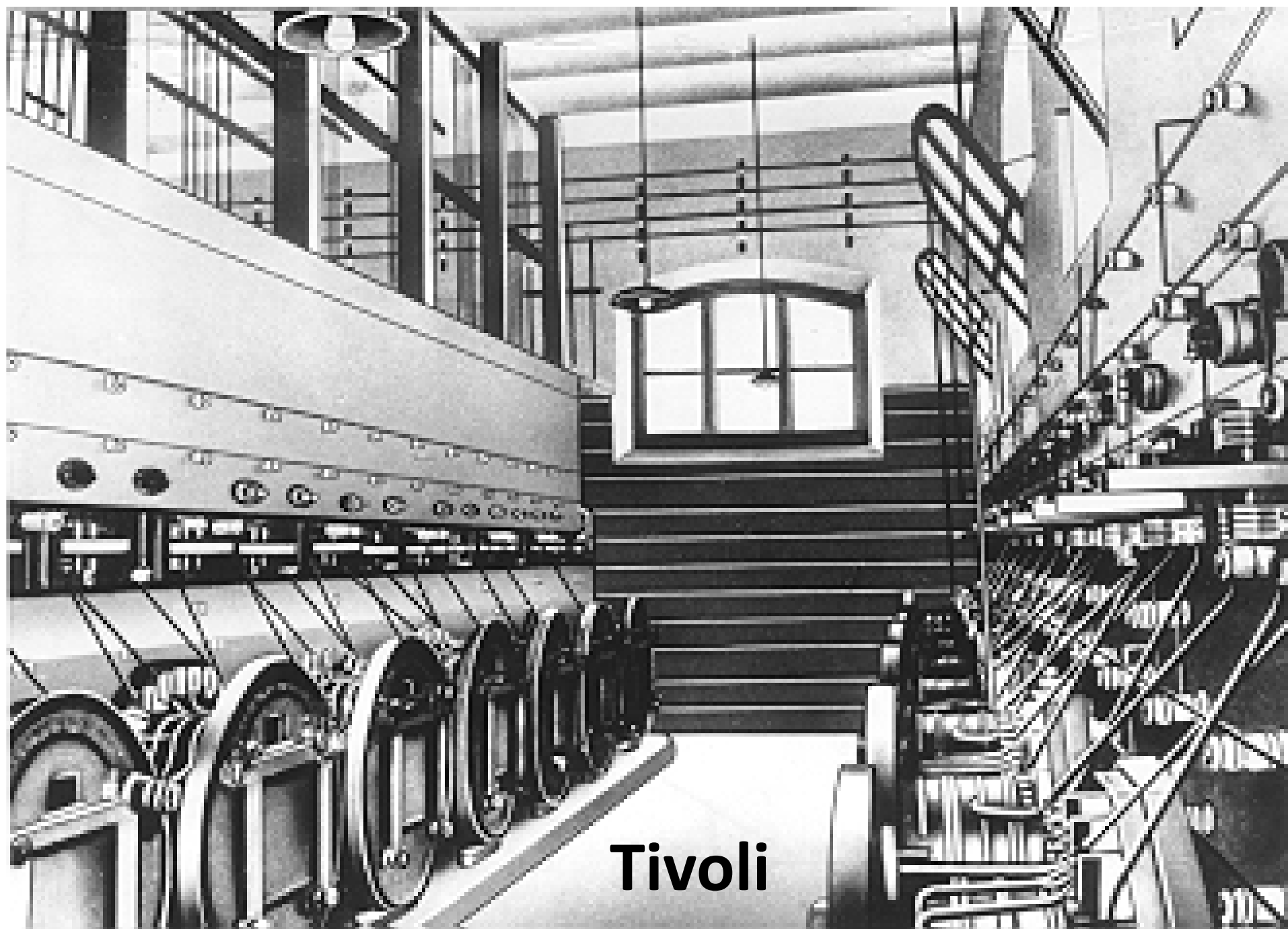


**Az olaszországi
Tivoli vízerőmű
1892
(GANZ Gyár
Budapest)**



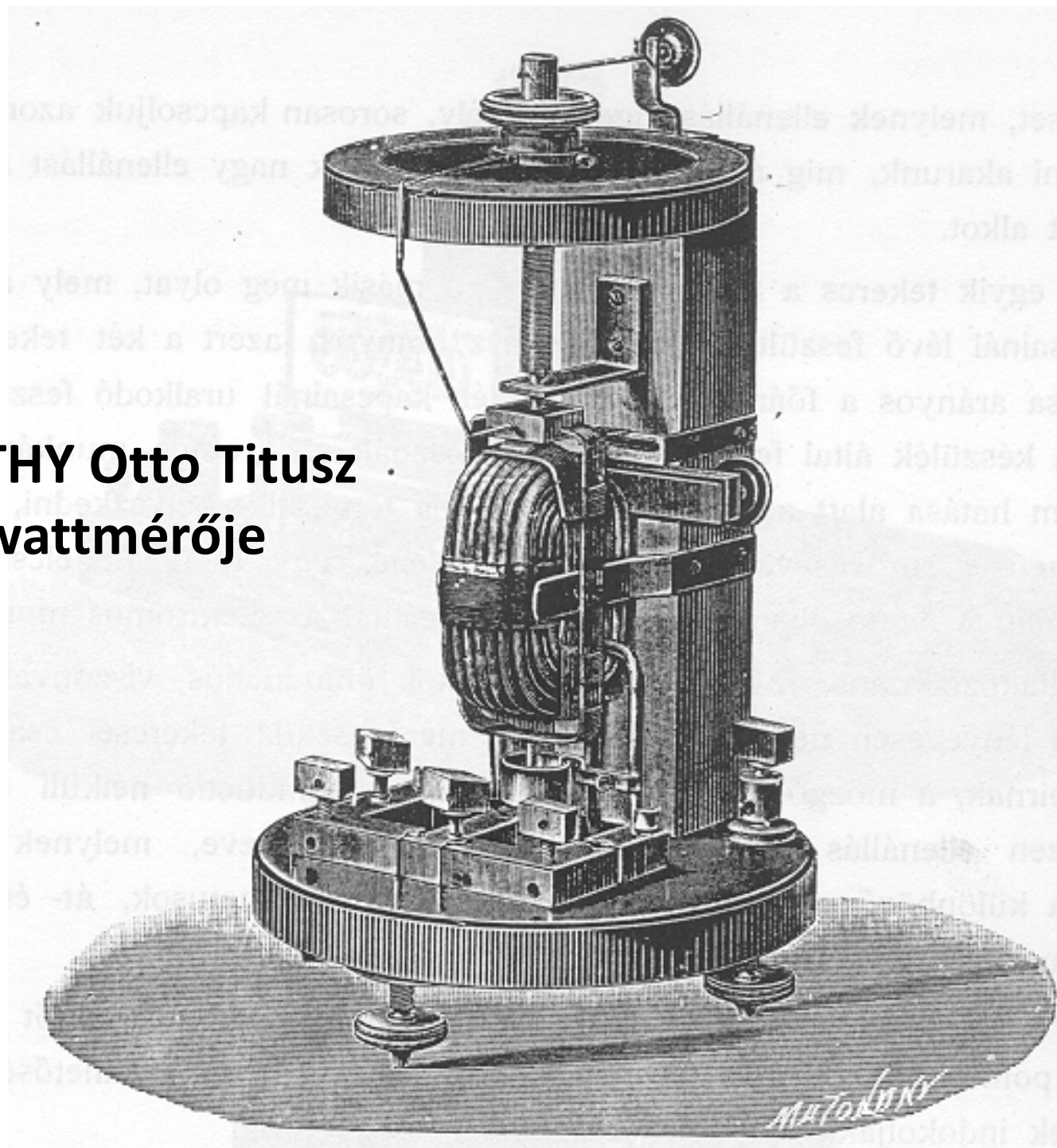


Tivoli 2005

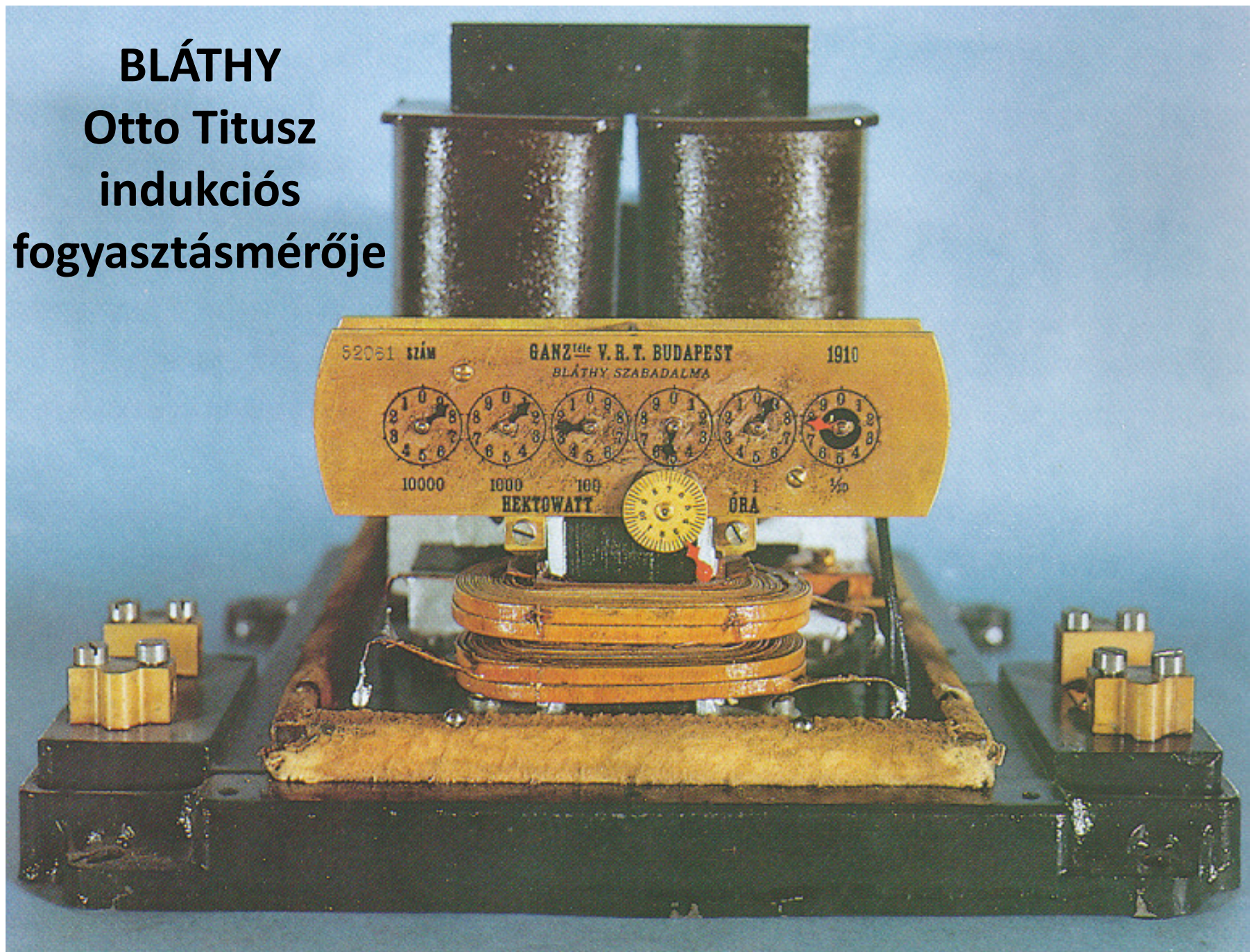


Tivoli

**BLÁTHY Otto Titusz
wattmérője**

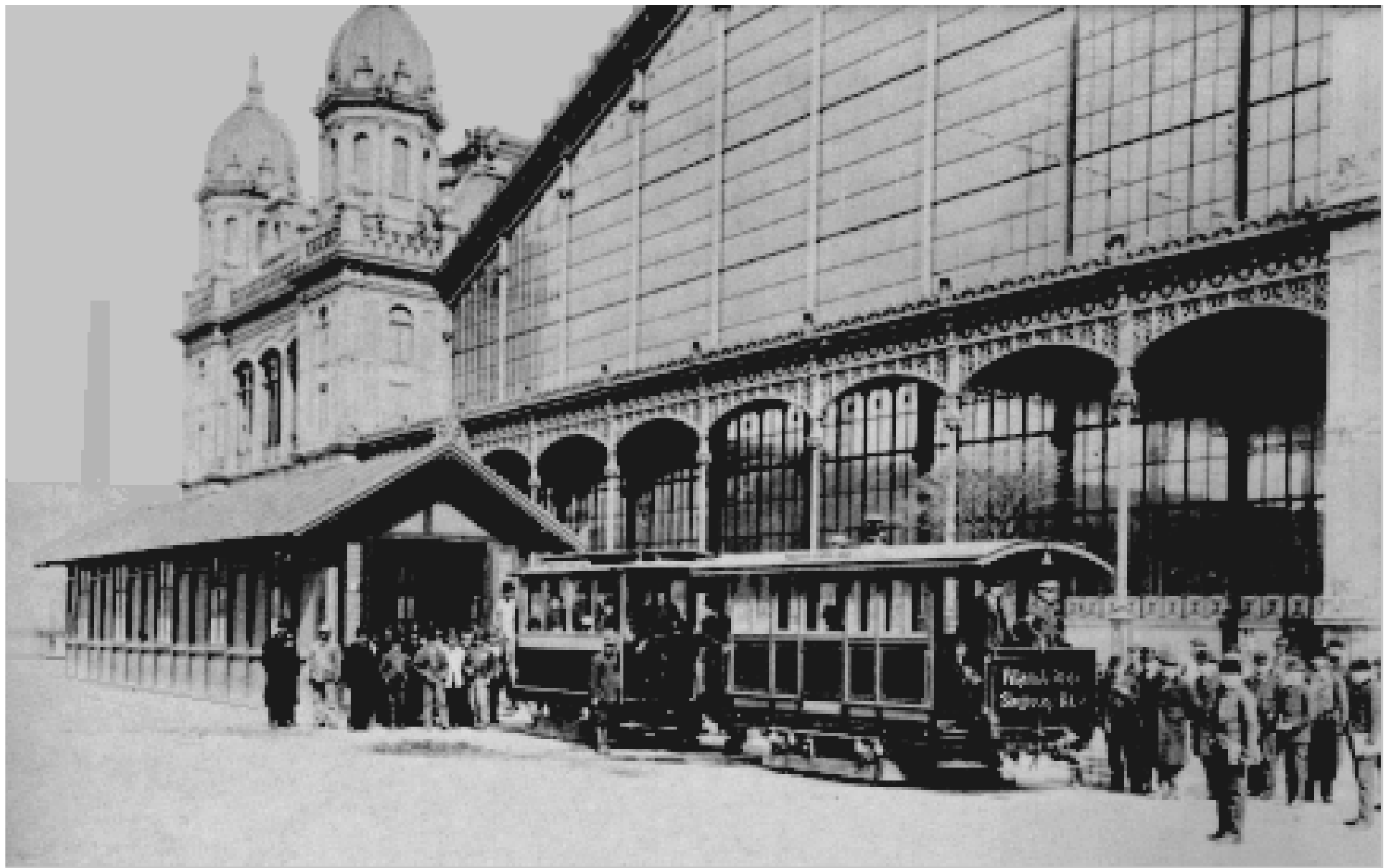


BLÁTHY
Otto Titusz
indukciós
fogyasztásmérője



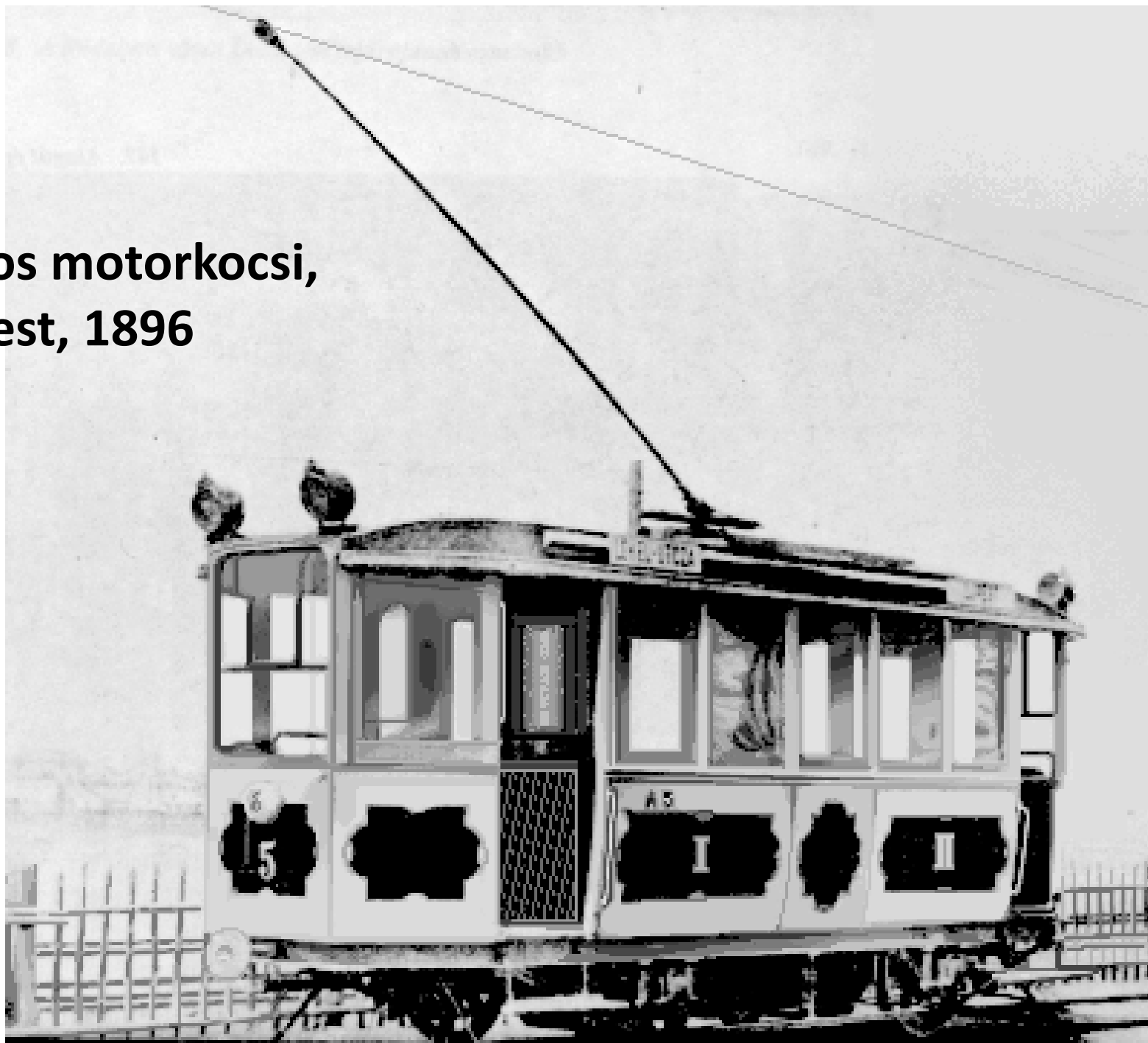


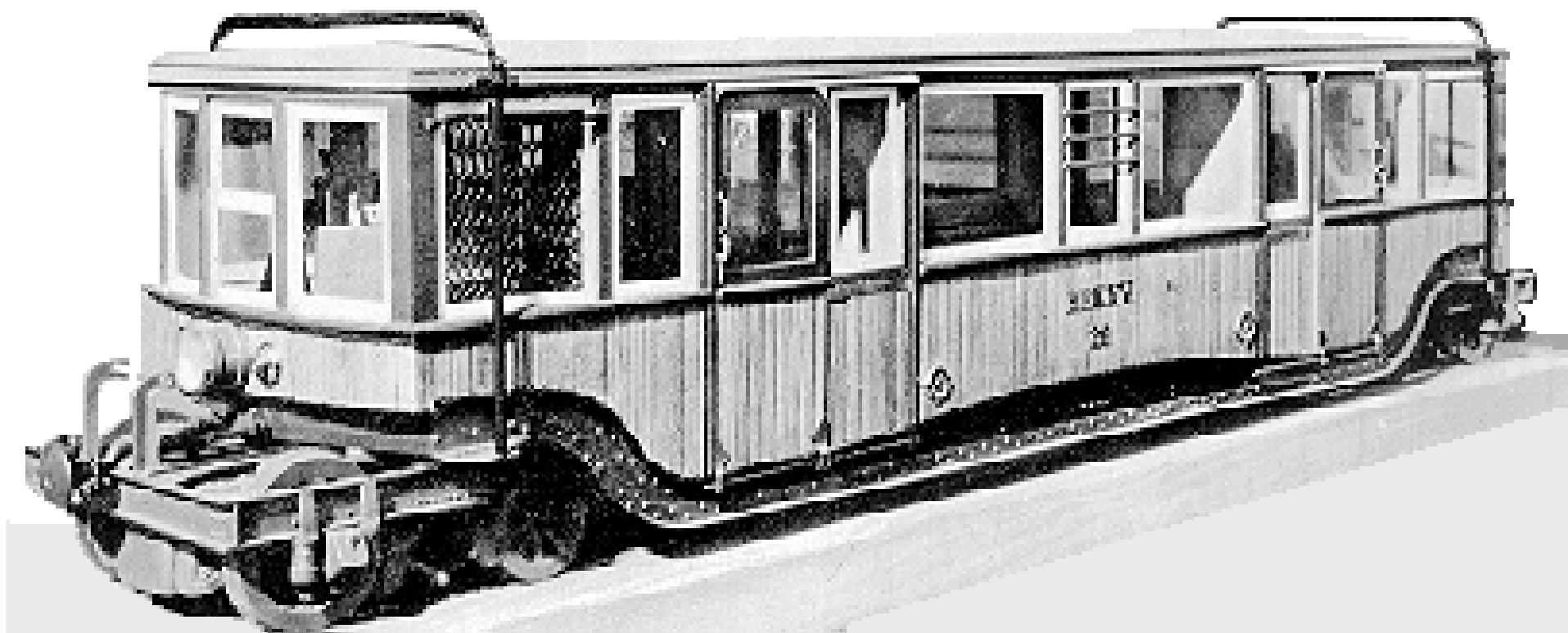
Váci úti Erőmű, Budapest, 1893



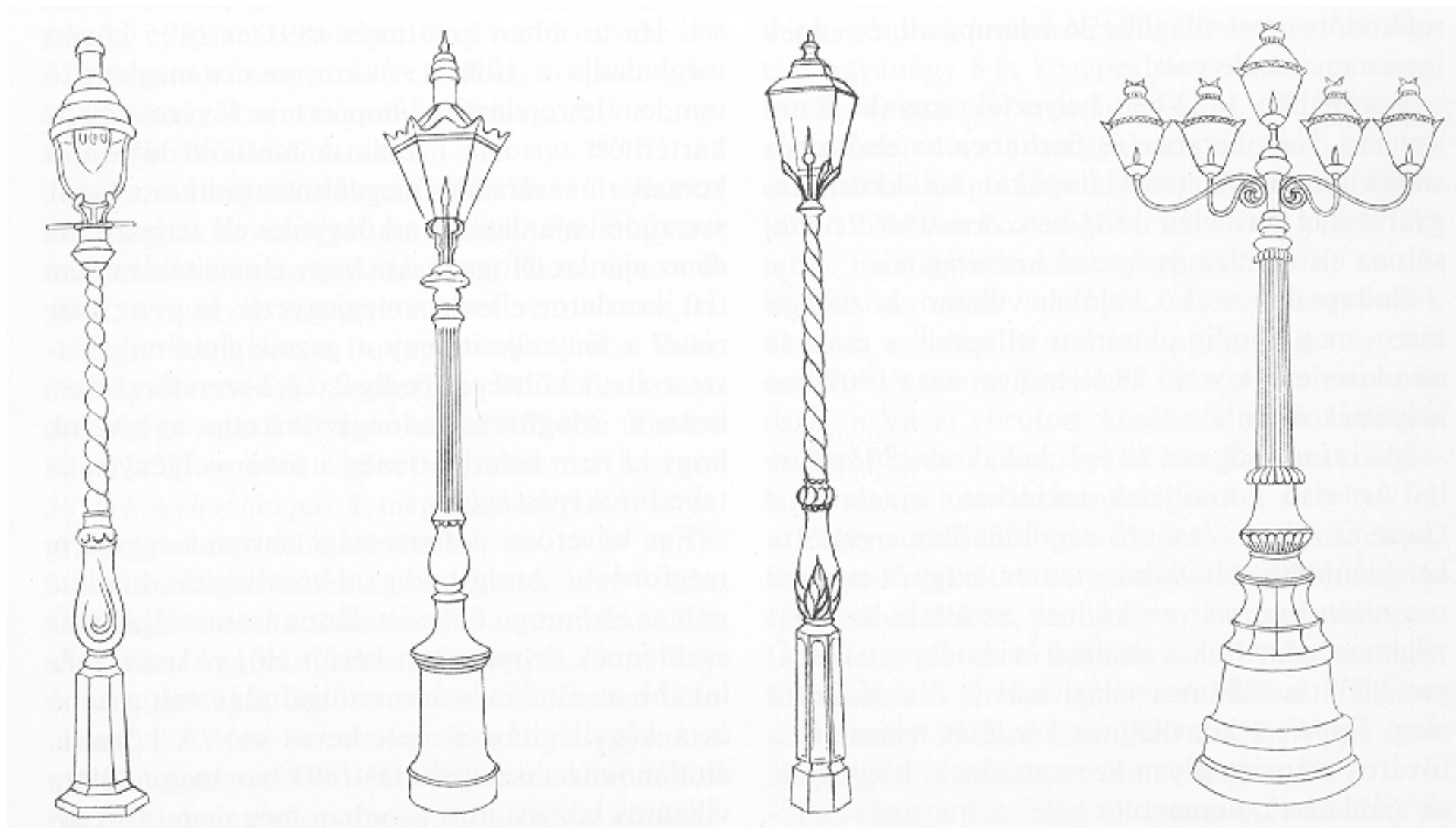
Villamosvasút, Budapest, Nyugati pályaudvar, 1887

**Villamos motorkocsi,
Budapest, 1896**





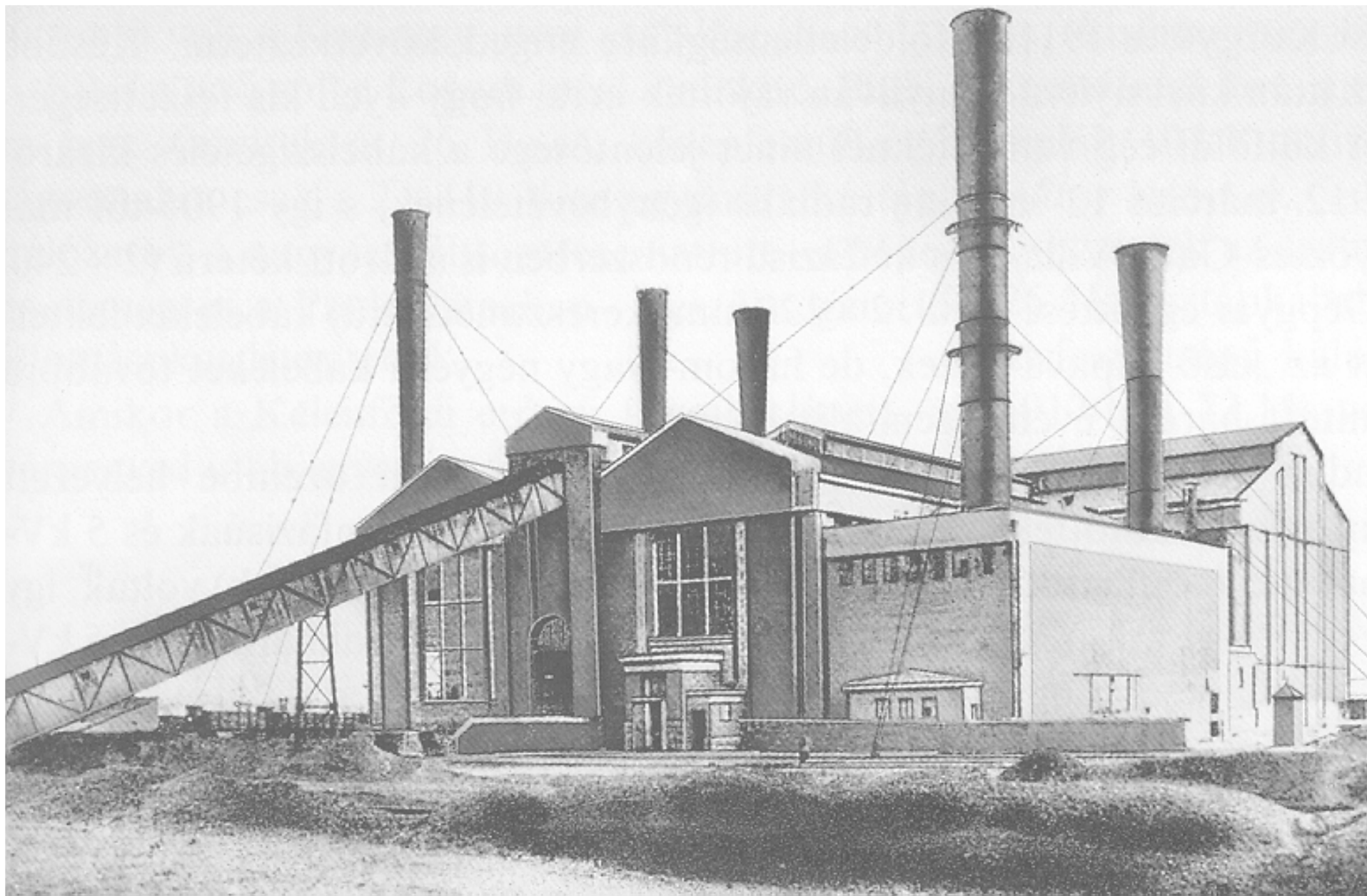
„KIRÁLY KOCSI” földalatti vasút, Budapest, 1896



Gázvilágítás 1892

Villanyvilágítás 1892

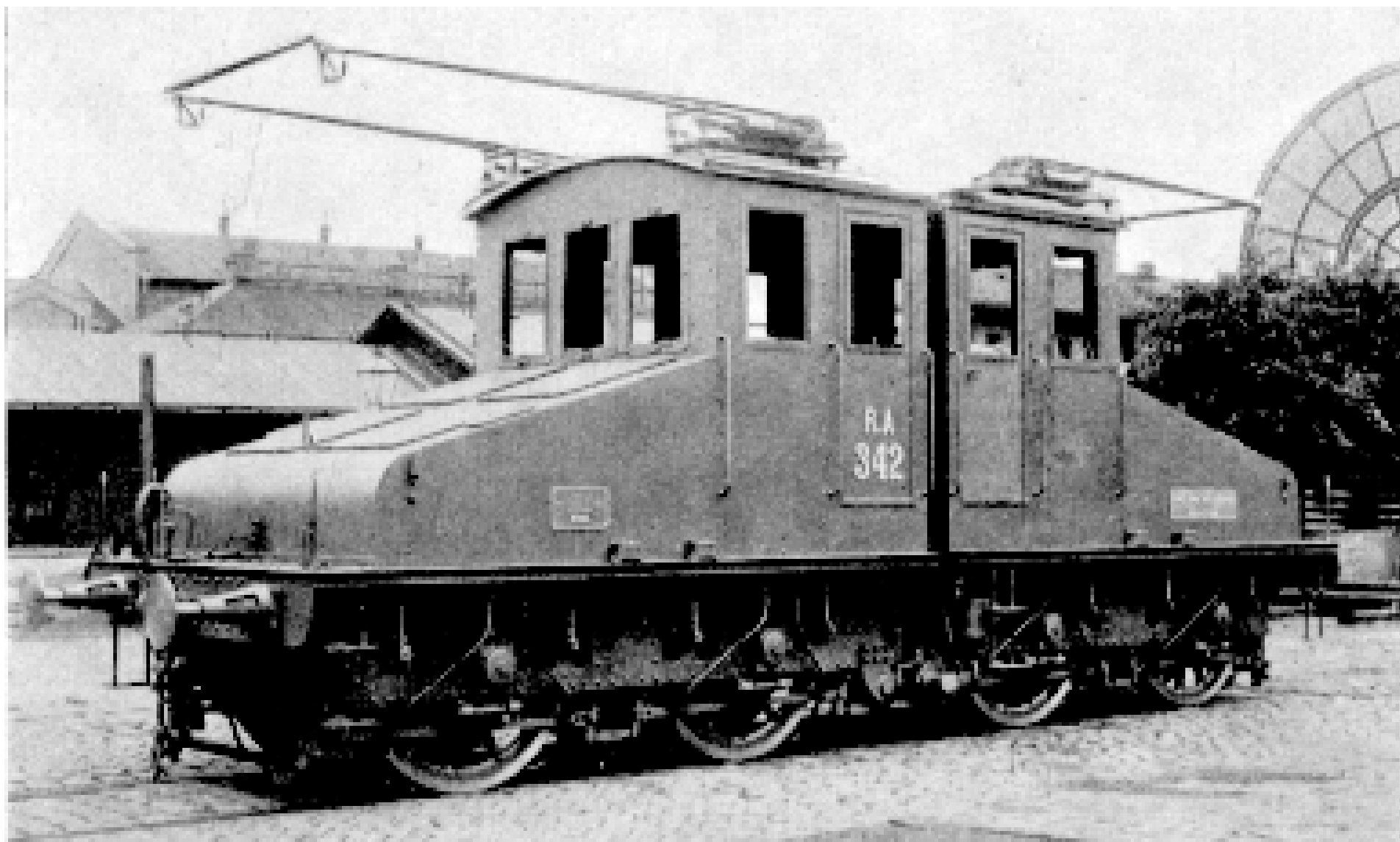




A Kelenföldi Erőmű, 1914

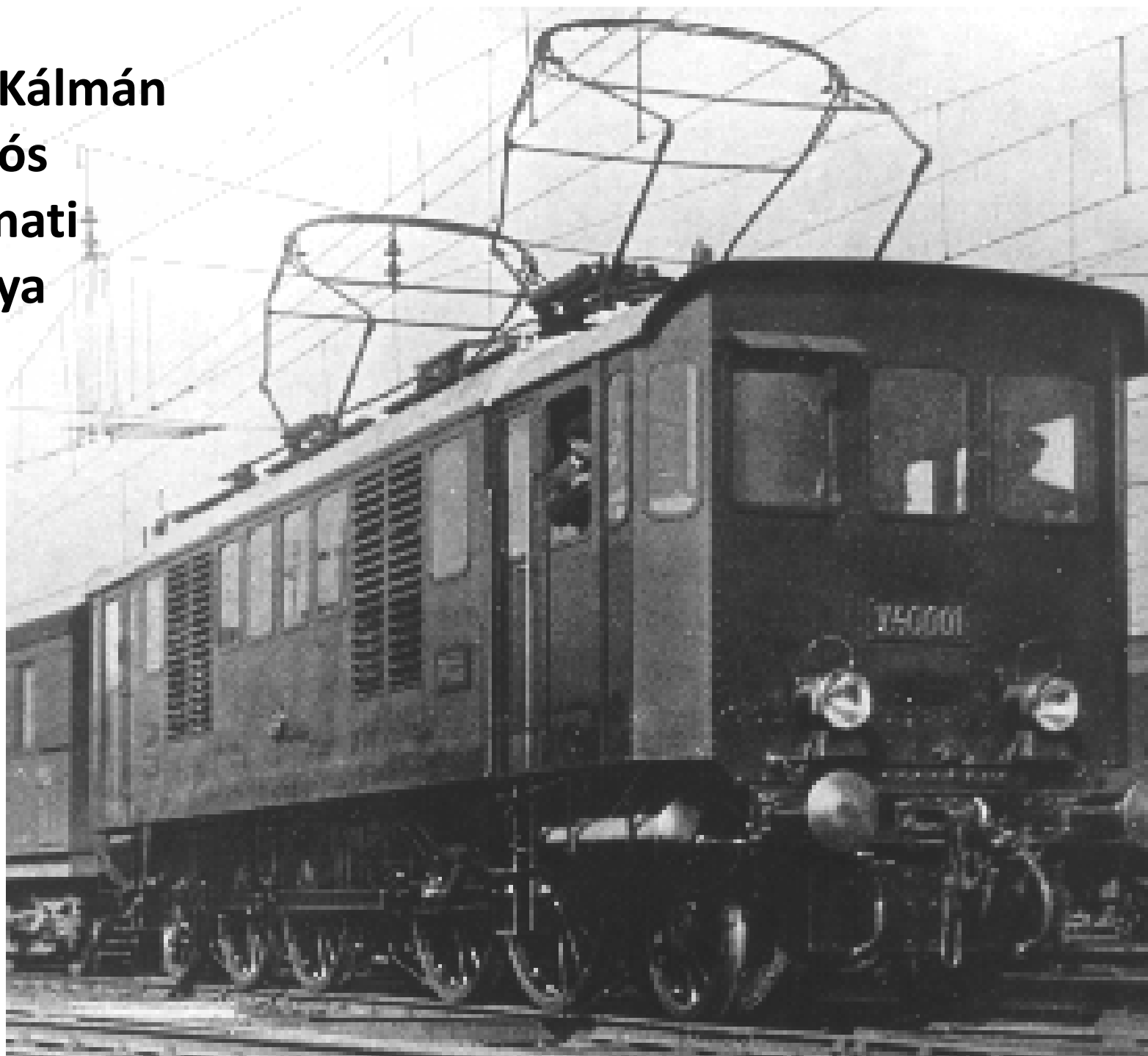
KANDÓ Kálmán
1869-1931
gépészmérnök
GANZ Gyár,
Budapest





Valtellina vasút, Olaszország, 1902
KANDÓ Kálmán villamos mozdonya

**KANDÓ Kálmán
fázisváltós
tehervonati
mozdonya
1932**



VEREBÉLY László
1883-1959
gépészmérnök,
Villamosmérnök,
egyetemi tanár,
a Magyar
Elektrotechnikai
Egyesület elnöke

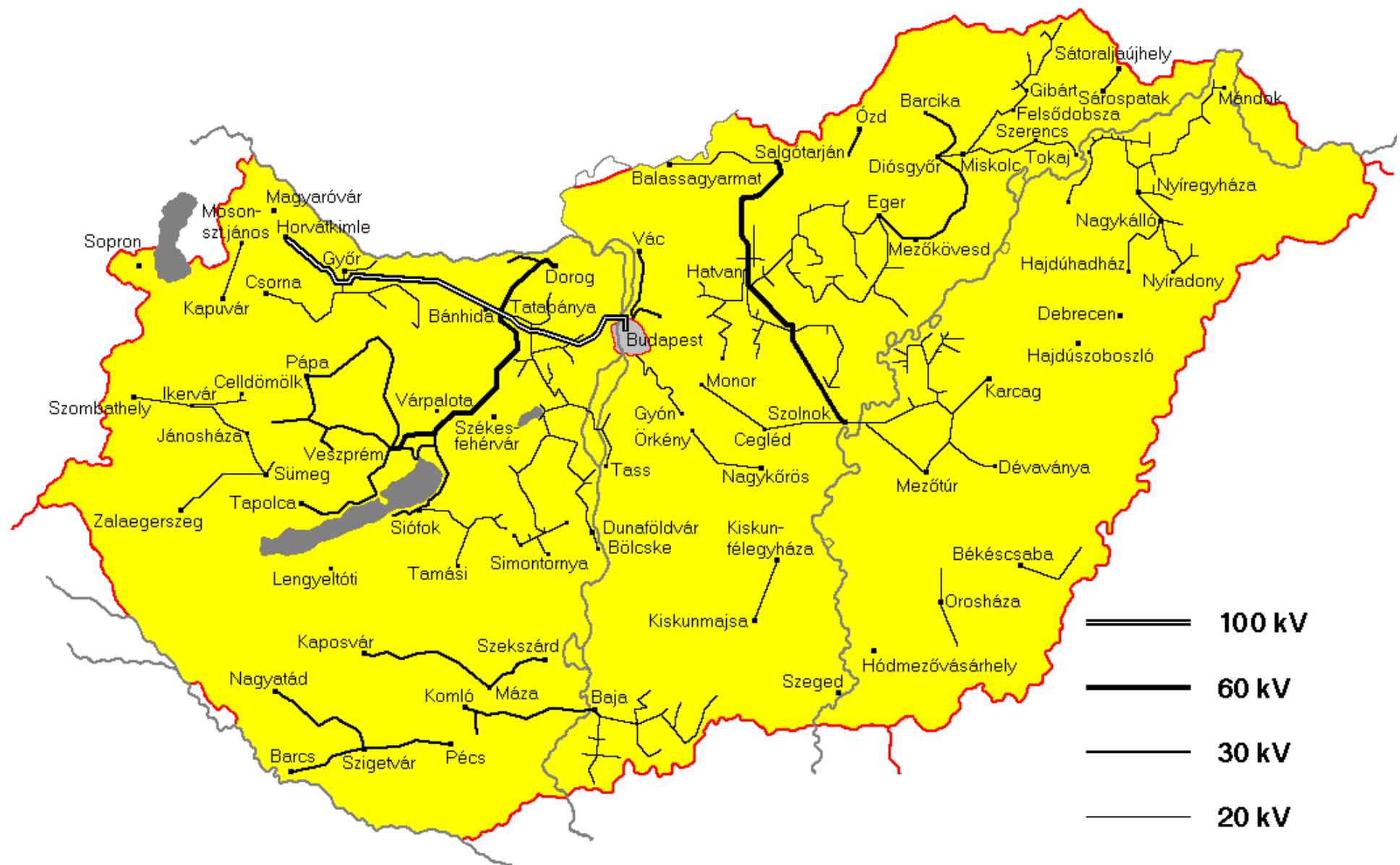




**Erőművek és villamosításra kijelölt vasúti fővonalak, 1923
(VEREBÉLY László)**



A Bánhidai Erőmű, 1930



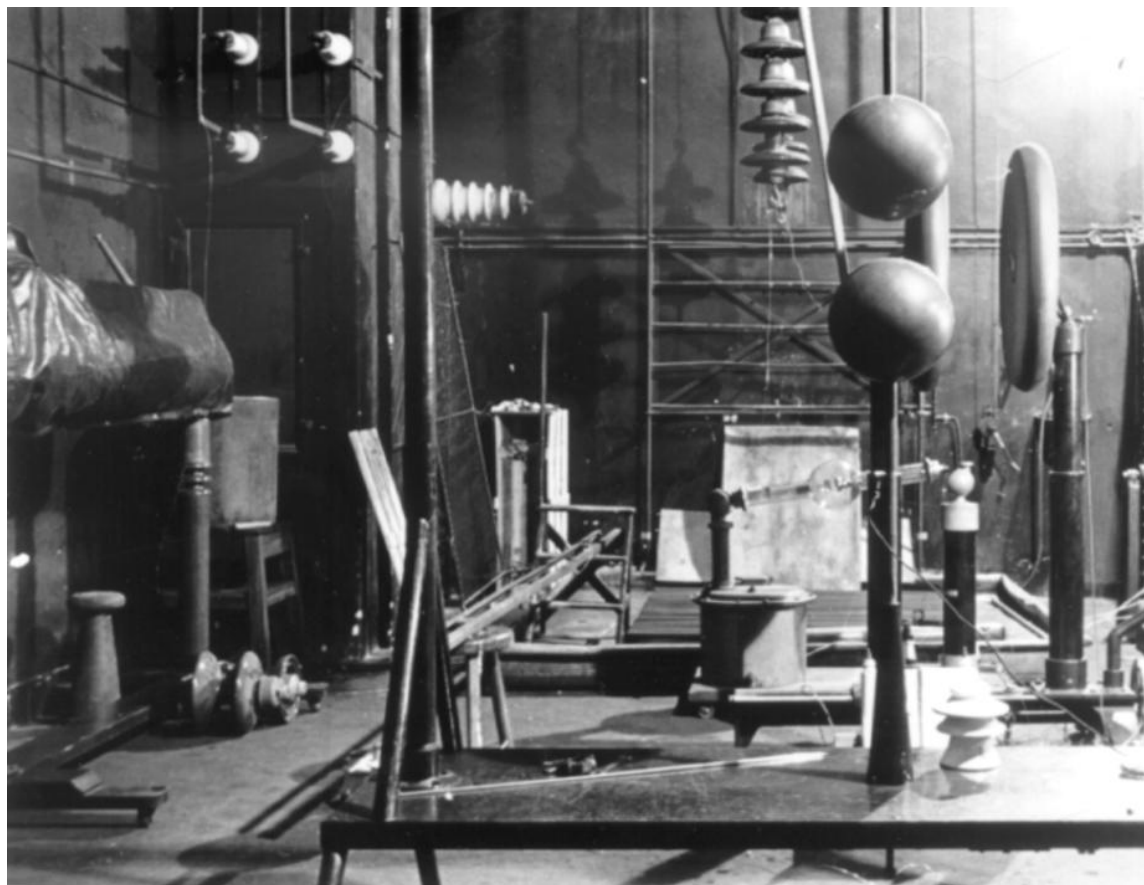
Magyarország 20 kV-os és annál nagyobb feszültségű távvezetékei, 1935 (VEREBÉLY László)

ZIPERNOWSKY Károly
1853-1942

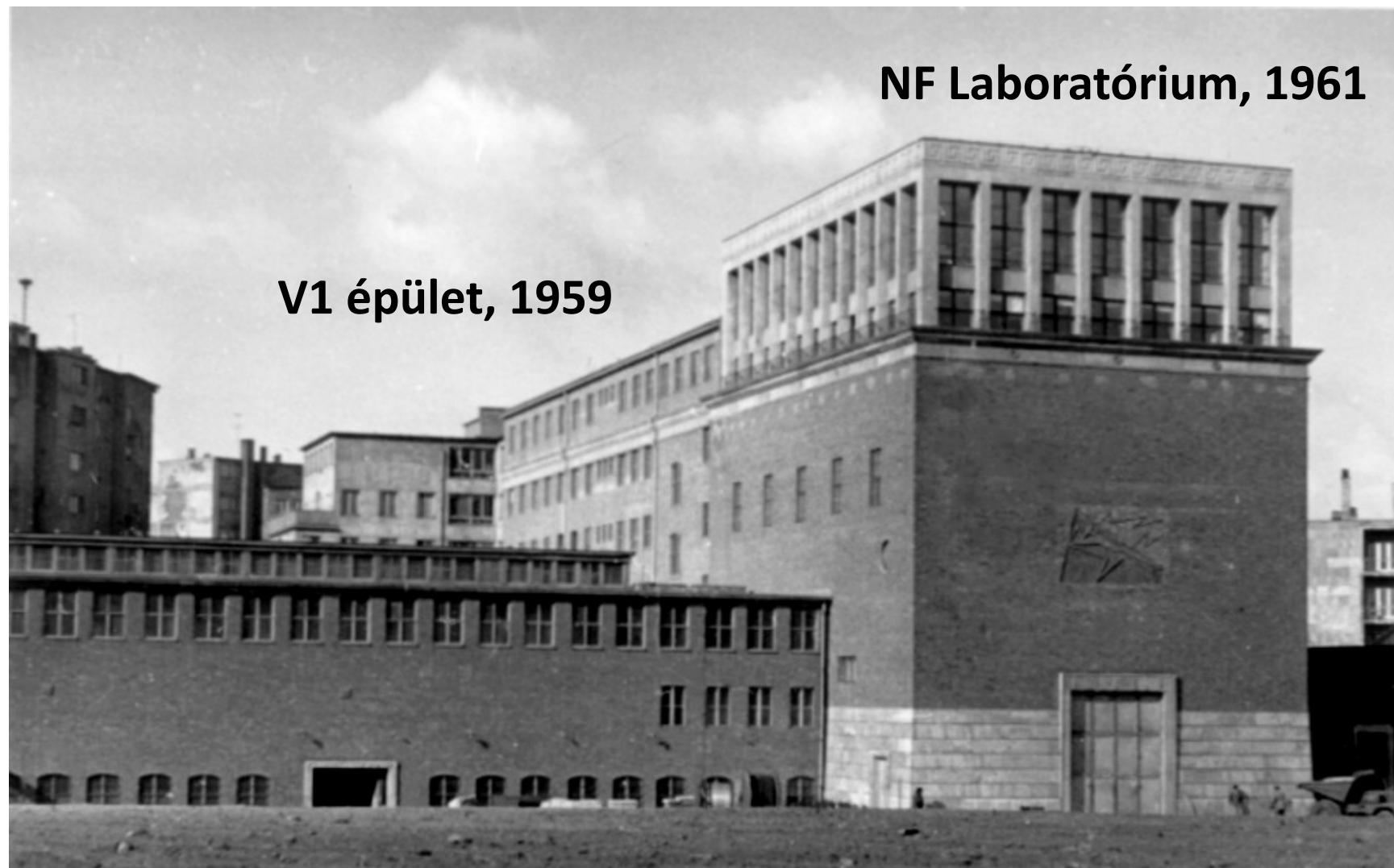
**A transzformátor
feltalálója**

**GANZ Gyár Budapest,
egyetemi tanár,
a Magyar
Elektrotechnikai
Egyesület elnöke**





**Nagyfeszültségű laboratórium az F épületben
1936 – 1959**



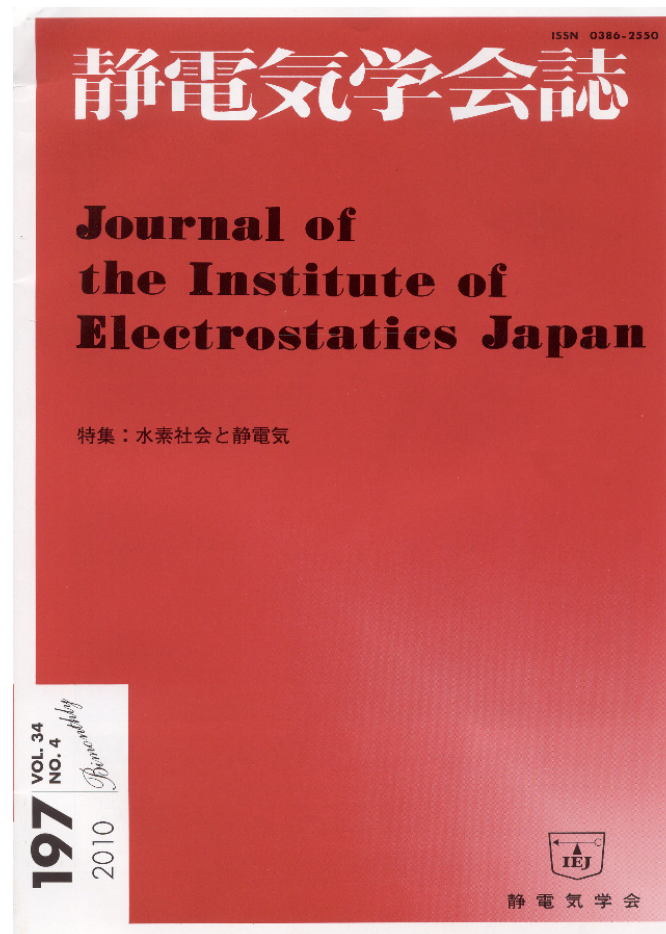
**Nagyfeszültségű Technikai és
Villamos Készülékek Laboratóriumok**

előtte



utána

**A Nagyfeszültségű Laboratórium felújítása a V1 épületben,
2012**



海外研究室めぐり



(Received March 29, 2010)

静電気学会誌, 34, 4 (2010) 205-206



High Voltage Laboratory at the Budapest University of Technology and Economics
 – eight decades of quality and advancement –
Prof. Dr. István Berta
berta@bme.hu

1. Introduction

Budapest, the capital of Hungary is situated on the two banks of the Danube River. Among its numerous universities, the Budapest University of Technology and Economics (BME) plays a fundamental role in the education of technical specialists, having altogether 24,000 students and with this, BME is the largest technical institution in Hungary. Education, research and R&D are conducted at eight faculties covering all the fields of science and technology.

2. The history of the High Voltage Laboratory



The High Voltage Laboratory at BME was founded in 1936 with the purpose to investigate the insulation of the high voltage equipment of the transmission lines. The installation of the first 250 kV transformers was soon followed by a 1000 kV impulse generator. In the 1970s when Hungary introduced the 750 kV OHL, the laboratory was equipped with a 600 kV test transformer and a 750 kV

impulse generator, too. Later the equipment of the laboratory was supplemented with many additional facilities, like an artificial rain and UV chamber, furnaces for thermal ageing etc. A static safe workplace is also available.

The laboratory has become a centre of research and education in the field of electrostatics (both atmospheric and industrial). Atmospheric electrostatics has been in focus from the beginnings, and research was expanded shortly to industrial electrostatics (both passive and active).

3. Projects conducted in the Laboratory

3.1. Electroronatic discharges

Protection against electrostatic hazards is one of the key research projects in the laboratory. Our goals are summarized in the so called SCOUT (Static Control Up-to-date Technology) project. This includes the investigation of the theory of formation of hazards, protection against them and risk assessment. Our achievements incorporate a computer aided decision supporting system, which is based on qualitative system approach evaluation, probability based risk assessment, expert system of building and application, automated diagnostics and control. The preventive and protective system developed at the laboratory is technically and economically optimized. The knowledge base built up allows us to elaborate planning and operation algorithms and



Propagating brush discharge

Contact: **Prof. Dr. István Berta**, Leader of Group of High Voltage Techniques and Equipment, berta.istvan@vet.bme.hu
Bálint Németh, Leader of High Voltage Laboratory, nemeth.balint@vet.bme.hu

Visiting Overseas Laboratories

High Voltage Laboratory at the Budapest University of Technology and Economics

– Eight Decades of Quality and Advancement –István BERTA 205

Siemens Corporate Research & Technology

– Introduction of the Laboratory for Advanced Combustion & Gas Cleaning Technologies –

..... Thomas HAMMER and David W. BRANSTON 207



GÉPÉSZMÉRNÖKI OKLEVÉL



A KIR. JÓZSEF-MŰEGYETEM REKTORA,

A GÉPÉSZMÉRNÖKI SZAKOSZTÁLY TANÁRTESTÜLETE NÉVÉBEN ANNAK DÉKÁNJA

Szegedi Gyula urat, ki Magyarországon, Biharmén, 1884-ben

született és műszaki tanulmányait a kir. József-műegyetemen az 1907-08-ik tanévben végezte és ez oklevél megszerzésére a kir. József-műegyetemen a matematikából, a mechanikából, a technikai fizikából, a hidrogépek szerkezetтанából, a kalorikus gépek szerkezetтанából és a mechanikai technológiából szabályszerűen tartott szigorlatoknak megfelelt és ez által a tudományokban szerzett *képzettségét* a szabályszerűen alakított szigorlati bizottságok előtt bebizonyította, a ránk ruházott hatalomnál fogva ezennel gépészmérnöknek elismerjük és valljuk.

Minek hitelül ezen oklevelet részére kiszolgáltattuk és a kir. József-műegyetem nagyobb pecsétjével, valamint sajátkezű aláírásunkkal megerősítettük.

Kelt Budapesten, *1918. évi október 31-én*

Szegedi Gyula

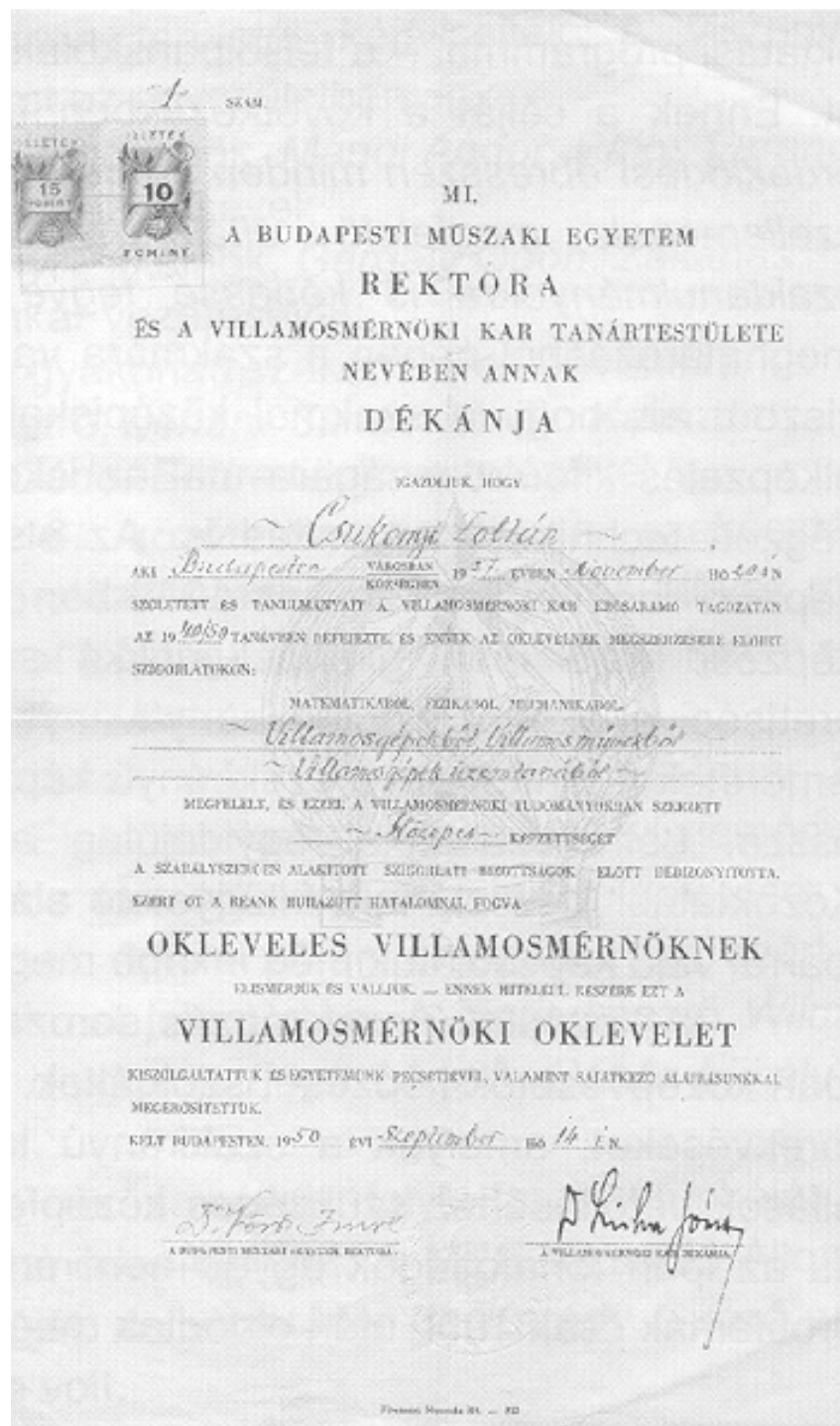
a kir. József-műegyetem a. i. rektora.

Imre József

a kir. József-műegyetem gépészmérnöki szakosztályának a. i. dékánja.

1918. október 31.

**Az első magyar
 villamosmérnöki
 oklevél,
 1950**



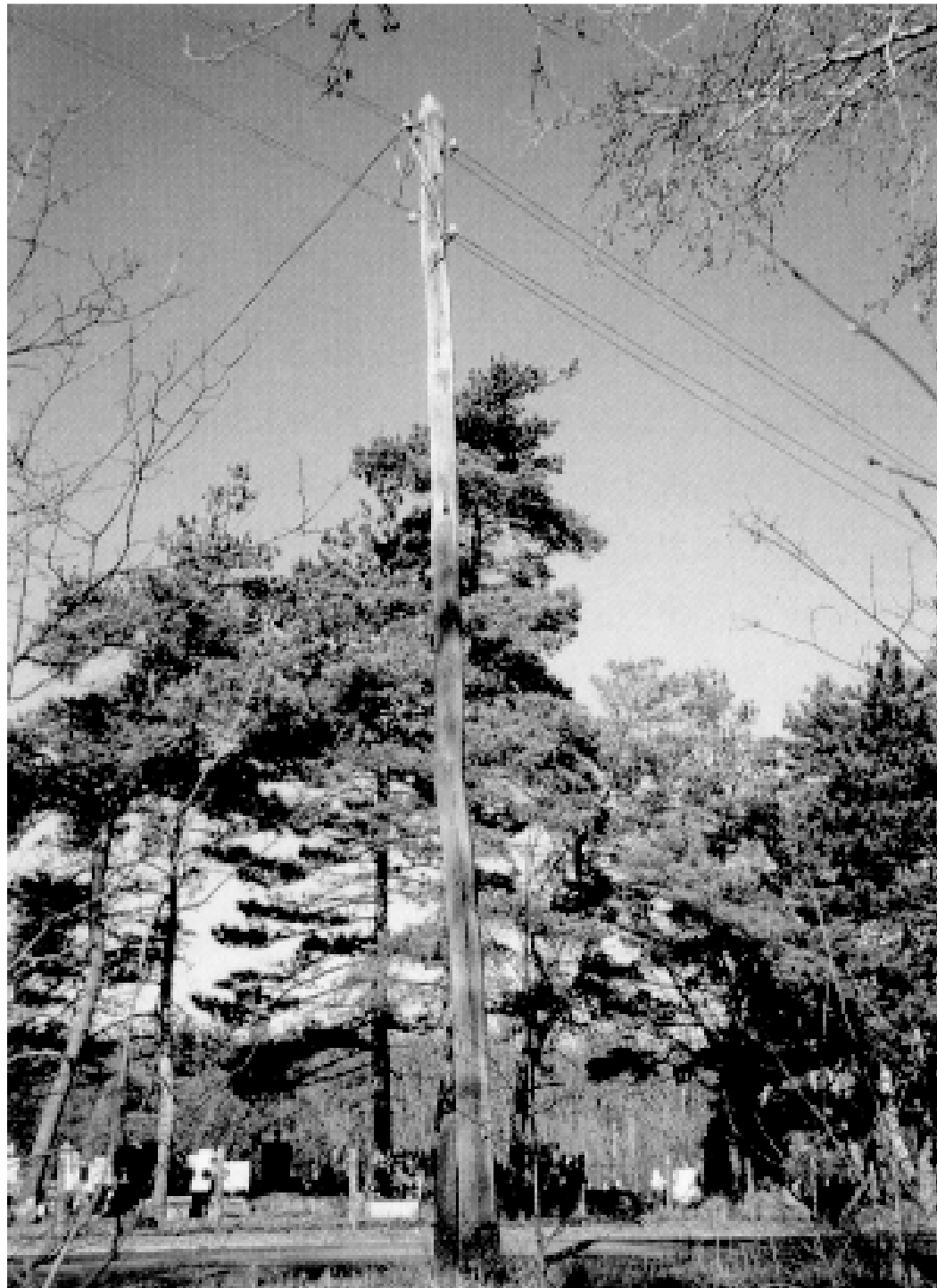
A Mátravidéki Erőmű, 1945





Az Inotai Erőmű, 1954

Faluvillamosítás 1948



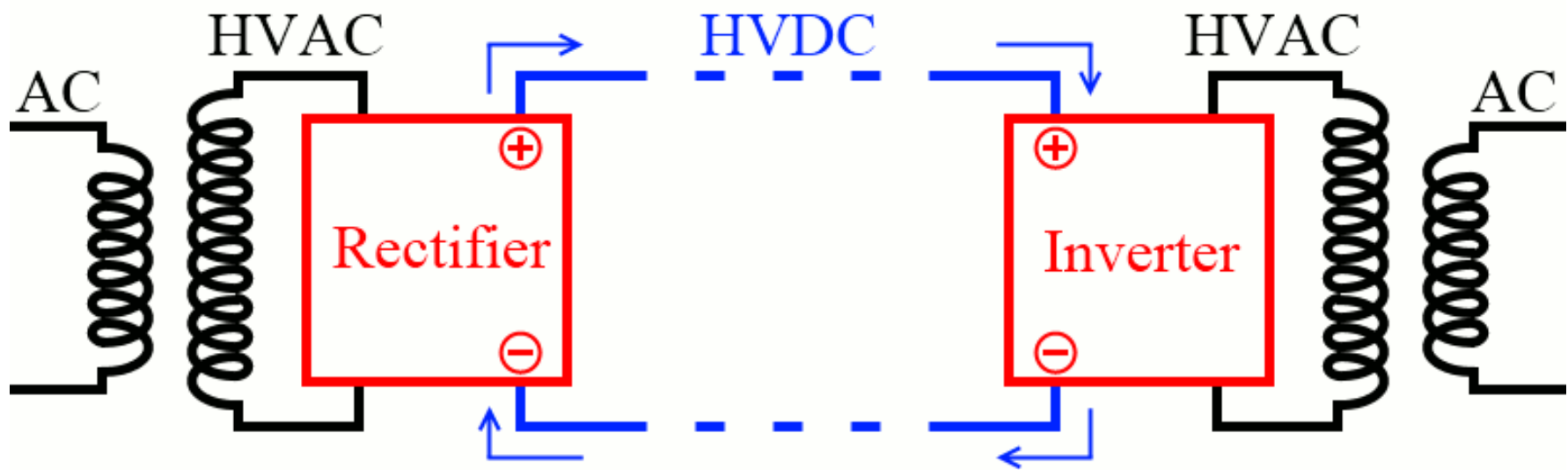


A Tiszaöki Vízerőmű 1954, Hajózózsilip 1958



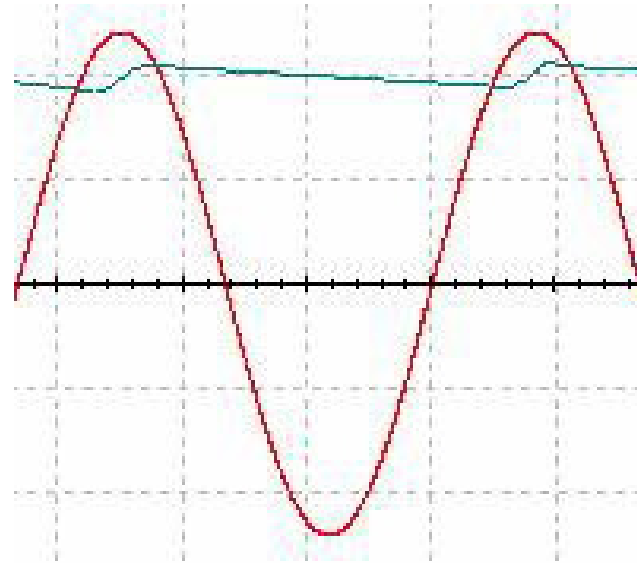
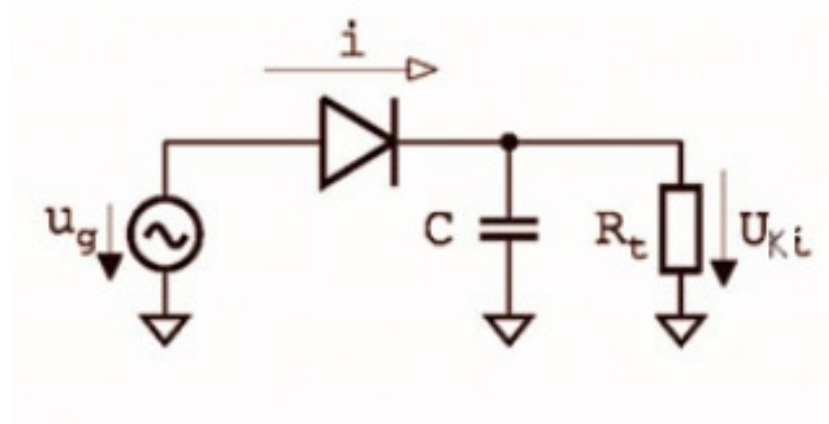
Az áramok háborúja

„The War of Currents”



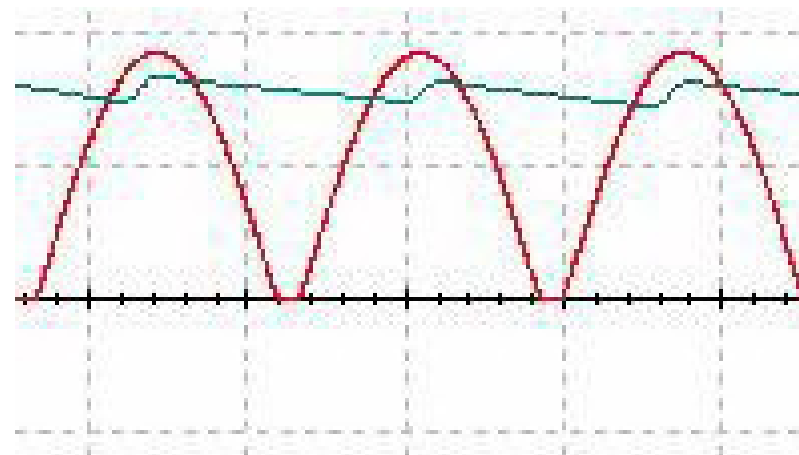
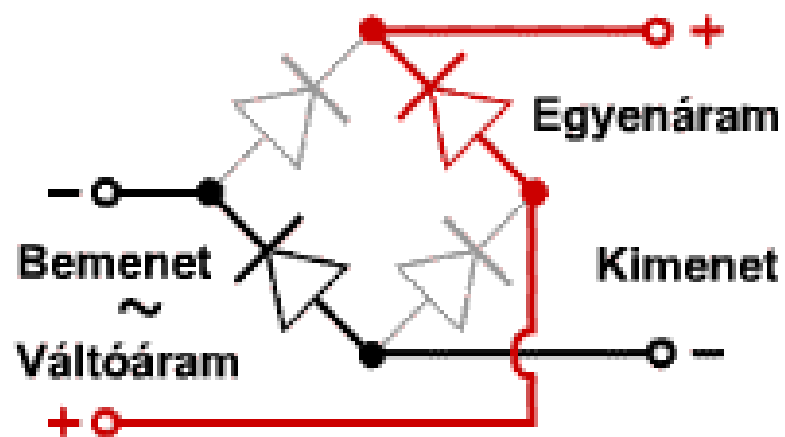
**Egyenáramú kuplung vagy konverter állomások
(egyen- és váltóirányítás)**

EGYENIRÁNYÍTÁS



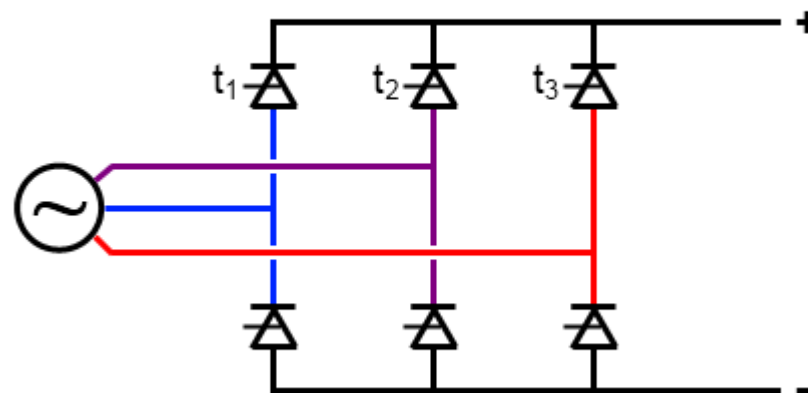
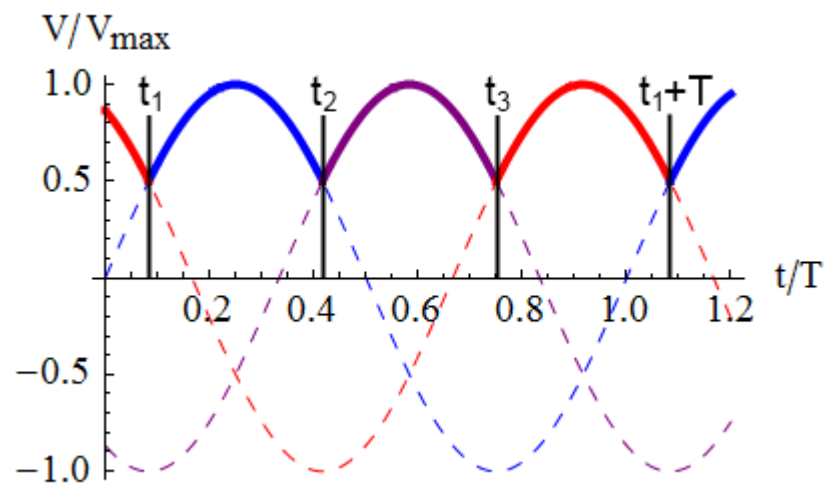
Egyfázisú váltakozó áramú generátor, dióda, ellenállás és kondenzátor – simított egyenáram

EGYENIRÁNYÍTÁS



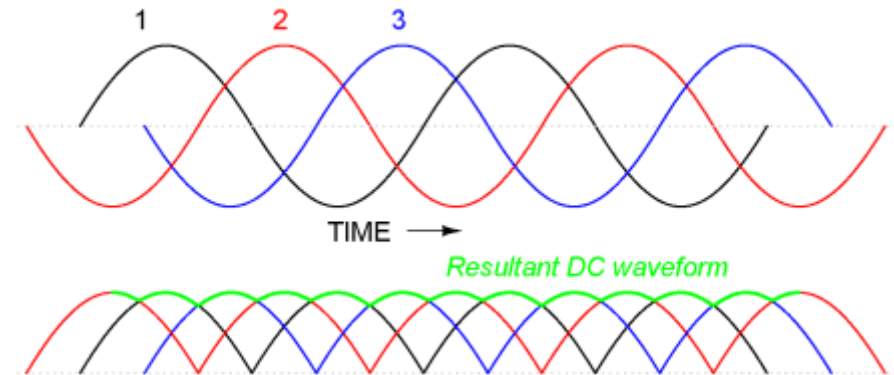
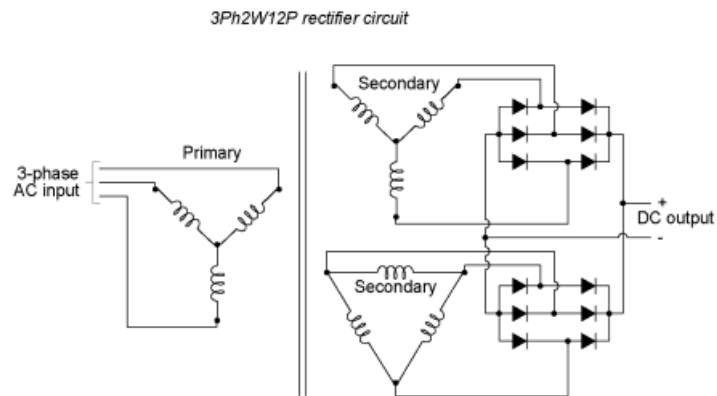
Graetz kapcsolás, egyfázisú kétutas simított egyenáram

EGYENIRÁNYÍTÁS



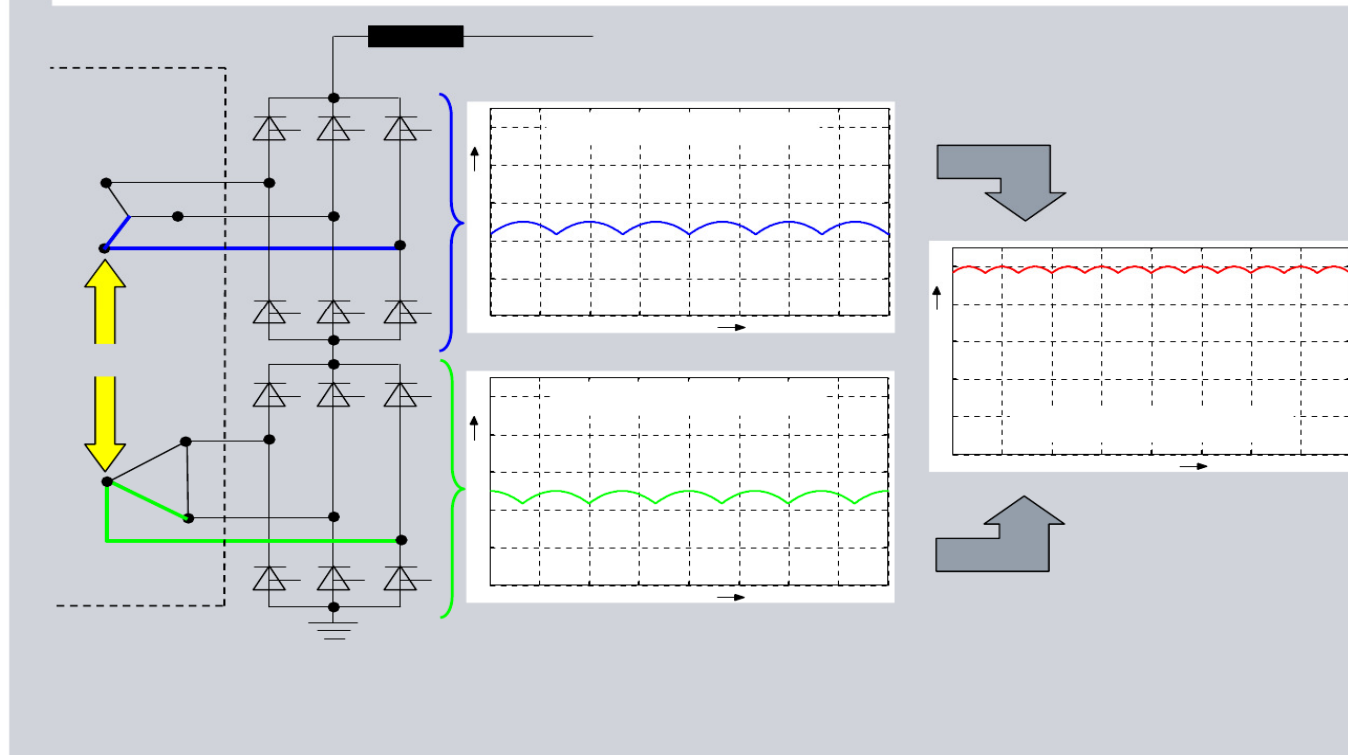
Háromfázisúfázisú simított egyenáram

EGYENIRÁNYÍTÁS



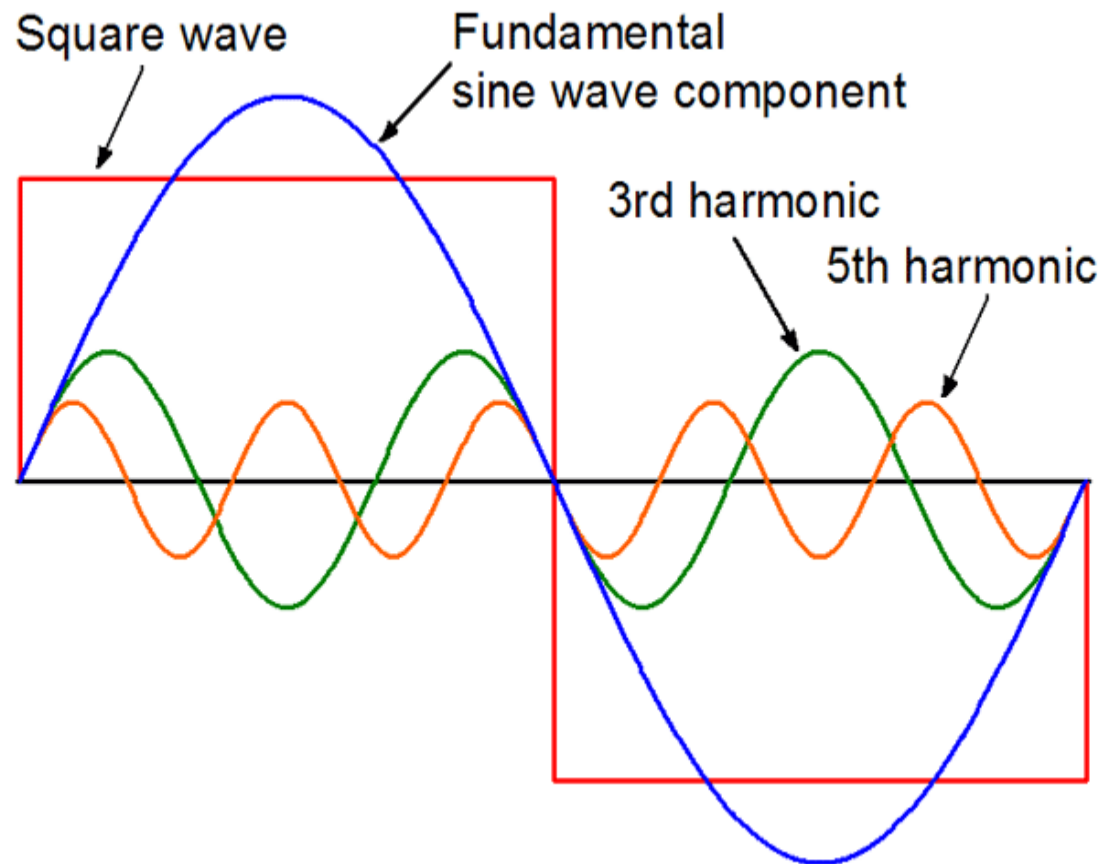
Háromfázisú kétutas 12 ütemű simított egyenáram
3Ph[ase]2W[ay]12P[ulse]

EGYENIRÁNYÍTÁS



2 db háromfázisú, kétutas, hatütemű hídkapcsolású egyenirányítóval létrehozott 12 ütemű simított egyenáram
(a párhuzamosan járó transzformátorok egyikének szekunder tekercse csillag-, a másiknak a szekunder tekercse 30 villamos fokkal eltolt delta kapcsolású)

INVERTÁLÁS



A sima egyenáramot tirisztorokkal a kívánt frekvenciájú periodikus, váltakozó négyszögárammá alakítjuk, majd szűrőkörökkel eltávolítjuk a felharmónikusokat, így megmarad a tiszta alapharmónikus áram.

A HVDC előnyeit és hátrányait időállóan foglalta össze Edward Wilson **Kimbark** (1902-1982) a szakmában alapműnek számító, 1971-ben megjelent **Direct Current Transmission** c. könyvében.

Előnyök:

1. Nagyobb az áramvezetőkénti átvihető teljesítmény.
2. A DC szabadvezeték szerkezete egyszerűbb, mint az AC vezetéké; kisebb a nyomvonal szélessége, egyszerűbb, tetszetősebb az oszlop.
3. A föld használható üzemi áram-visszavezetőként.
4. Következésképp minden egyes szigetelt áramvezető külön áramkört tud képezni.
5. Nincs kapacitív töltőáram.
6. Nincs skin-hatás (azaz az áramvezető egyenáramú ohmos ellenállása kisebb, mint a váltakozó áramú).
7. Az egyenáramú kábelek nagyobb feszültség-gradienssel üzemelhetnek.
8. Az egyenáramú távvezeték teljesítmény-tényezője mindig egységnyi, azaz nincs meddőteljesítmény, csak hatásos.

9. Kisebb a koronasugárzási veszteség és a rádió-interferencia, mert az áramvezető körüli állandósult tértöltés virtuális átmérő növekedést okoz.
10. Nem szükséges, hogy az egyenáramú távvezeték végponti alállomásai szinkronban legyenek egymással.
11. Következésképp a távvezeték hosszát nem korlátozza a stabilitás.
12. Aszinkron üzemelő vagy különböző névleges frekvenciájú villamos energia rendszerek, vagy villamos energia rendszerek egyesülései összekapcsolhatók.
13. Az egyenáramú távvezeték rövidzárlati áramai kisebbek, mint a váltakozó áramúé.
14. A váltakozó áramú villamosenergia-rendszer perturbációit (pl. zárlatait, lengéseit) sem az egyenirányító, sem az inverter nem engedi át (tűzfal), azaz a velük összekapcsolt váltakozó áramú rendszerek nem tudják megnövelni egymás zárlati teljesítményét.
15. Az egyenáramú összeköttetésen keresztül áramló teljesítmény könnyen szabályozható.
16. Adott szigetelés (pl. léghöz, kábel érszigetelése) $\sqrt{2}$ -ször nagyobb feszültséget bír el.
17. A DC kábel összeköttetés hossza többszöröse lehet az AC összekötés hosszának.

Nagy (5-15 GW) villamos teljesítmény nagy távolságra (2-3000 km-re) olcsóbban (kisebb beruházási és veszteség-költséggel) szállítható HVDC-vel, mint HVAC-vel.

Hátrányok:

1. Az áramirányítók drágák.
2. Az áramirányítók jelentős meddő teljesítményt igényelnek, amelyet a konverter alállomásokon kell előállítani.
3. Az áramirányítók felharmónikusokat termelnek, ezért szűrőkörökre van szükség.
4. Az áramirányítókat kevésbé és sokkal rövidebb ideig lehet túlterhelni, mint a váltakozó áramú kapcsolóberendezéseket.
5. Mivel nem létezik nagyfeszültségű egyenáramú megszakító, ez akadályozza többvégpontú (multiterminális) vagy hálózatos alakzatok létrehozását.

(Ez a Kimbark-könyv írásakor, 1971-ben még így volt; ma már [2012 óta] léteznek félvezetős és kombinált HVDC megszakítók, tehát létesíthetők többvégpontú HVDC alakzatok.)

KANADA



**1985-ben épült 937
km-es, ± 500 kV-os,
1800 MW-os Bipole 2
egyenáramú
távvezeték**



1414 km-es, $\pm$ 533 kV-os, 1920 MW átviteli képességű bipoláris egyenáramú távvezeték a Dél-afrikai Köztársaságban.

Az 1977-79 között épült 7000 oszlopos vezeték két, egymástól 1 km-re lévő oszlopsoron halad, az áramvezető 4 $\times$ 565, a védővezető 1 $\times$ 117 mm²-es.

Földvezetéke a kb. 2000 km hosszban elnyúló, mintegy 150 m vastag feketeszen mező, melybe csak le kellett fúrni.

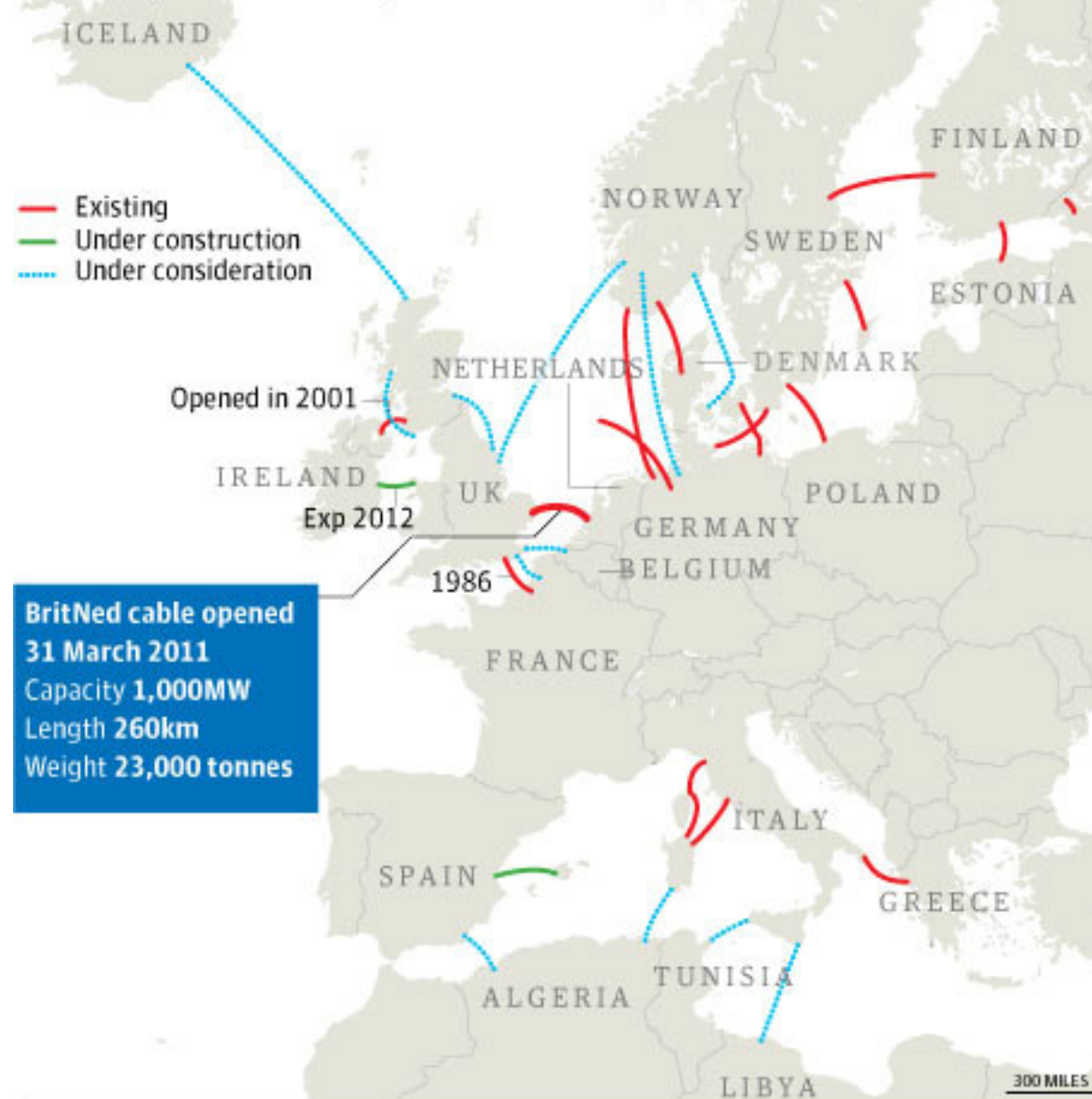
Az 1980-as évek elején, a mozambiki polgárháborúban 4200 oszlopa megsemmisült vagy súlyosan megrongálódott. 1998-ra állították helyre.

DÉL-AFRIKA



The European supergrid

High voltage direct current power transmission projects



2008-ban helyezték üzembe a világ legnagyobb átviteli kapacitású, nagyfeszültségű egyenáramú kábelét Norvégia és Hollandiai között.

Az 580 km-es kábel terhelhetősége 700 MW.
Készítéséhez 9000 t rezet és 12 000 t ólmot használtak fel,
össztömege 47 000 t.

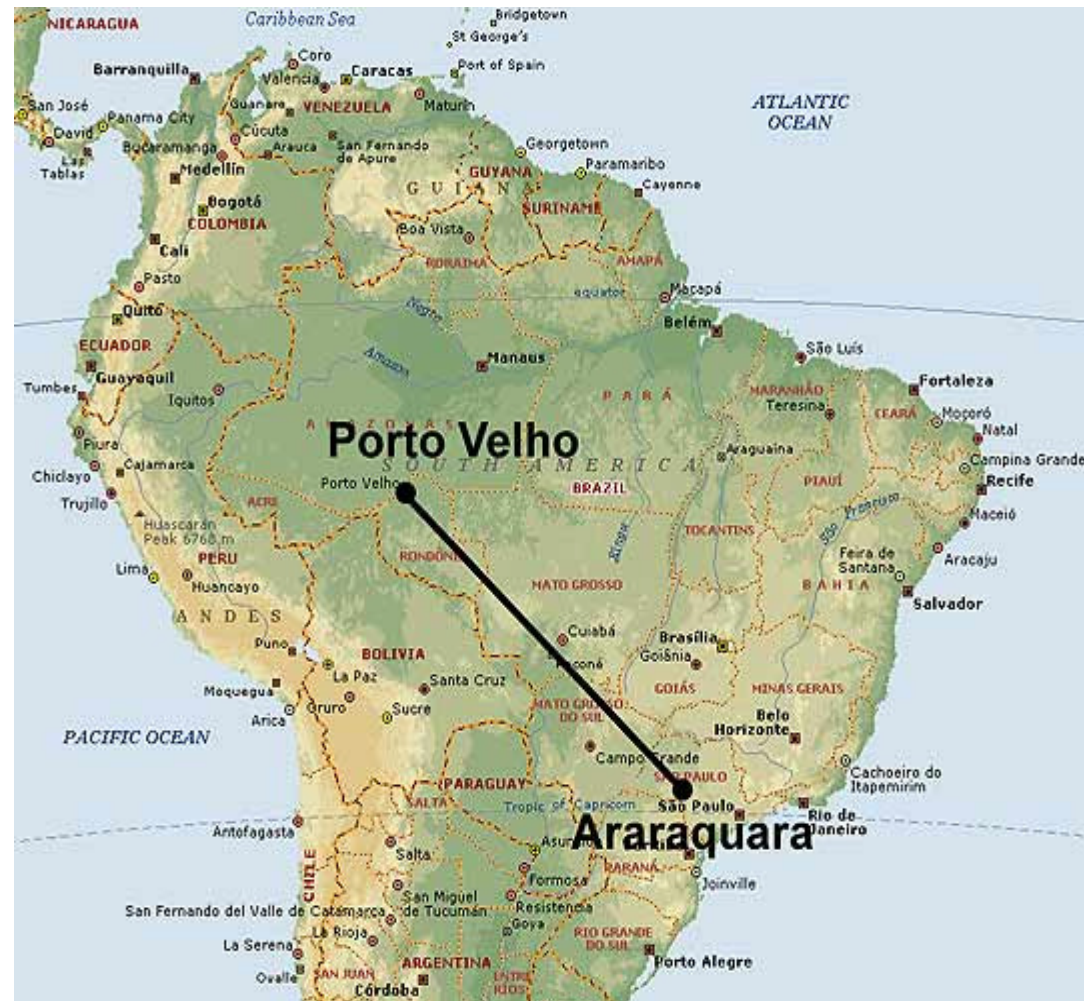


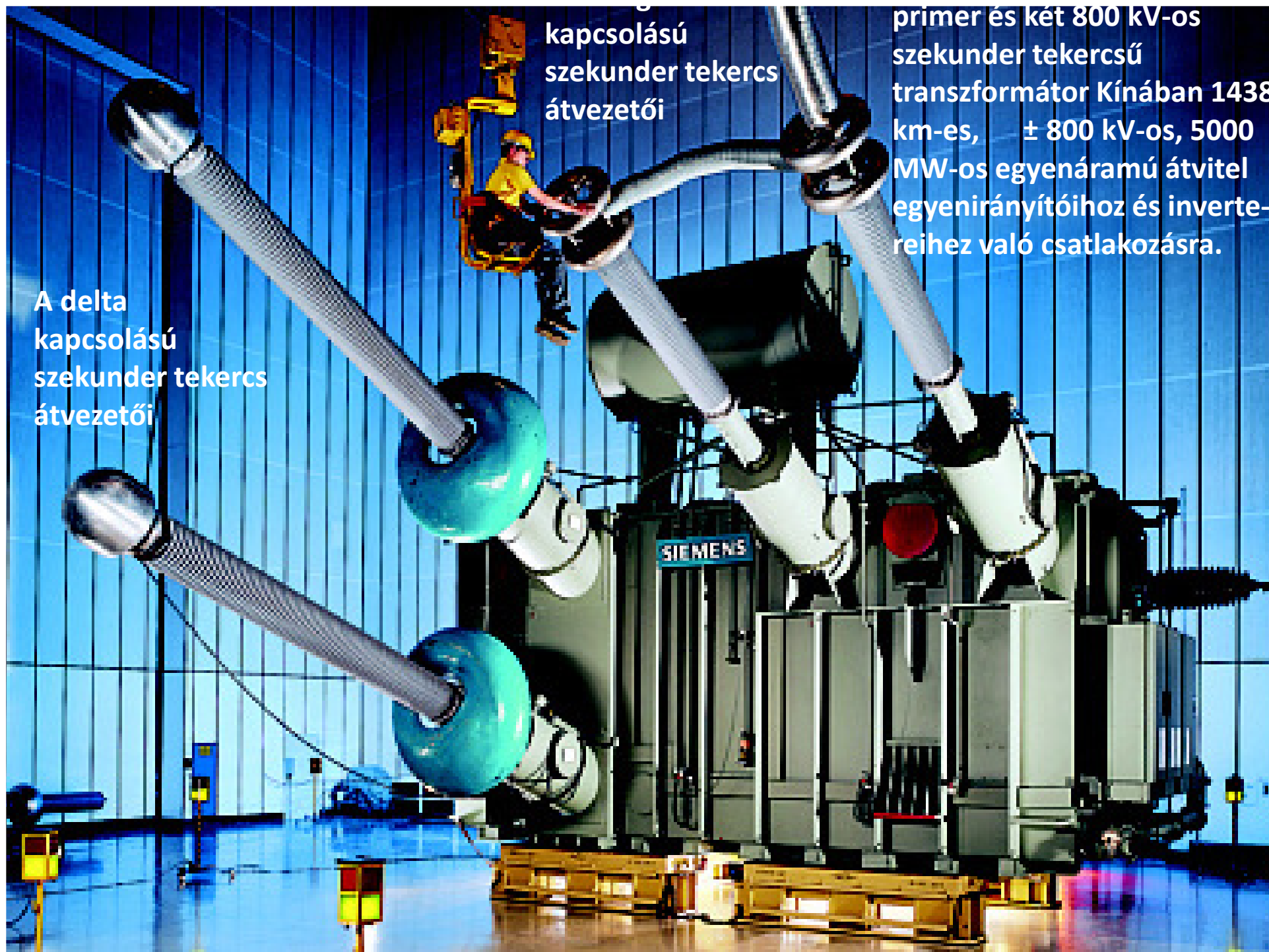


**Árokásó és kábelfektető robotgép
tenger alatti HVDC kábelhez**

BRAZILIA

**2500 km-es, $\pm$ 600 kV-
os, 3150 MW átviteli
képességű
egyenáramú távvezeték**





kapcsolású
szekunder tekercs
átvezetői

primer és két 800 kV-os
szekunder tekercsű
transzformátor Kínában 1438
km-es, ± 800 kV-os, 5000
MW-os egyenáramú átvitel
egyenirányítóihoz és inverte-
reihez való csatlakozásra.

A delta
kapcsolású
szekunder tekercs
átvezetői



**A ± 800 kV-os HVDC összeköttetés
transzformátorának szekunder
tekercséhez tartozó 14 m hosszú
kompozit átvezető szigetelő**

**Elöl a csillag kapcsolású tekercsek átvezető-szigetelői,
hátsó a delta kapcsolásúaké**

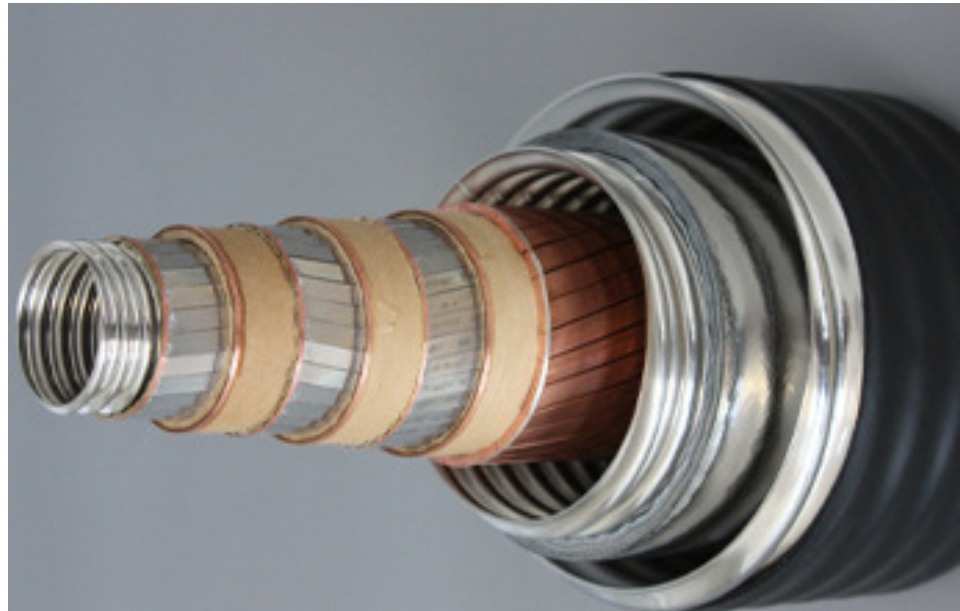
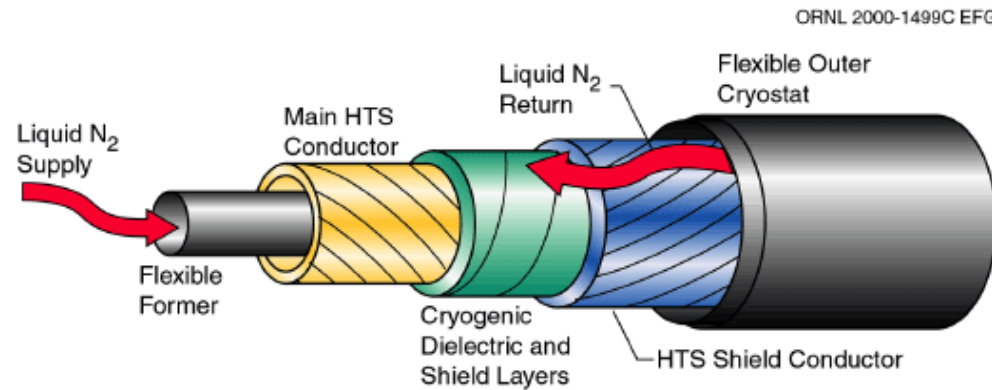


A kínai ± 800 kV-os, 5-7000 MW átviteli kapacitású egyenáramú távvezetékek jellemző nyomvonala





**USA, Long Island Power Authority-nak
2008-ban üzembe helyezett
nagyhőmérsékletű szupravezető kábele
138 kV AC, 574 MW → 2400 A(!)**



Folyékony, 77,3 K-nél hidegebb nitrogénnel hűtött nagyhőmérsékletű szupravezető (HTS – high temperature superconductive) kábel felépítése és fényképe

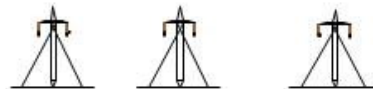
Remote power resources:
Transmission alternatives 10.000 MW - 3000 km

Line losses



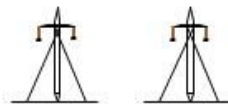
800 kV AC

20 %



660 kV HVDC

13 %



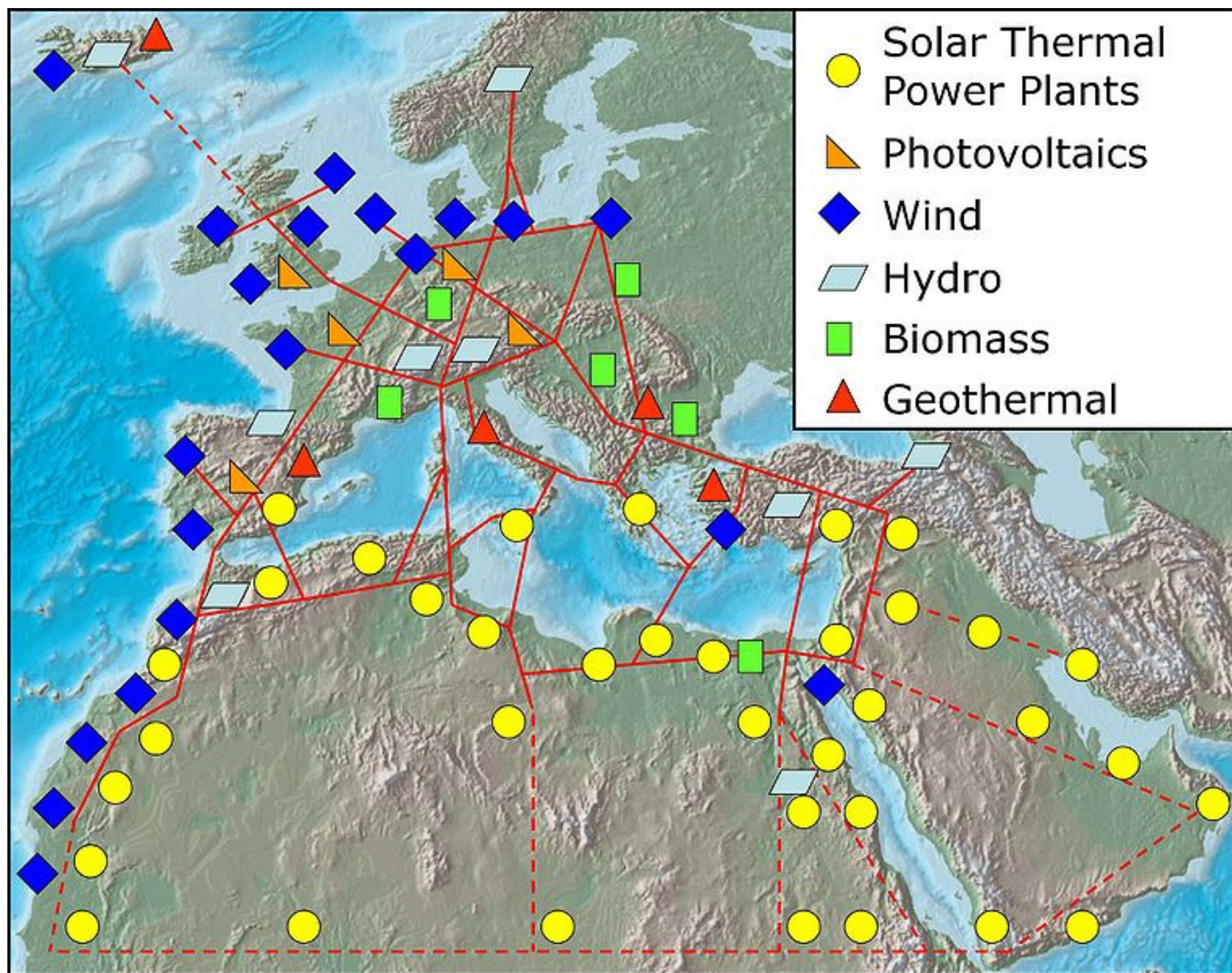
800 kV UHVDC

11 %



1000 kV UHVDC

9 %



**KÖSZÖNÖM
A
FIGYELMET!**

VIVEMA13

Váltakozó áramú rendszerek 1

3+0+0 f 4k

2016

készítette

Dr BERTA István egyetemi tanár és
Dr SZEDENIK Norbert egyetemi docens

Dr HORVÁTH Tibor professzor emeritus és
Dr NÉMETH Endre egyetemi docens
könyvei és előadásai felhasználásával

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamos Energetika Tanszék
Nagyfeszültségű Technika és Berendezések Csoport

NF – 0 – 1 – 2 – 3

- 0 Az áramok háborúja (múlt – jelen – jövő)**
- 1 A villamos erőterek jellemzői. Energia és erőhatások villamos erőterekben. Feszültségeloszlás szigetelőkön. A váltakozó villamos terek analitikus és numerikus számítása.**
- 2 Villamos szigetelőanyagok változó erőterben. Vezetés és polarizáció, polarizáció spektrum. Szigetelésre kapcsolt váltakozó feszültség, vektorábrák, rétegezett szigetelések. A szigetelők villamos anyagjellemzői, azok frekvencia- és hőmérsékletfüggése. Villamos veszteségek (veszteségi tényező, dielektromos veszteségek).**
- 3 Váltakozó villamos erőterek előállítása és mérése. Kábelek és távvezetékek erőtere. Váltakozó feszültségű szigetelésvizsgálat. Feszültség-igénybevételek, próbafeszültségek.**

A villamos igénybevételre méretezés alapjai

$$U \rightarrow E$$

$$E_{\max} = f(U, \text{geometria})$$

$$E_{\text{megengedett}}$$

$$E_{\text{üt}}$$

$$E_{\max} \leq E_{\text{megengedett}} = E_{\text{üt}} / b$$

A BIZTONSÁGI TÉNYEZŐ

látható biztonság: $U_{pr} / b_{\text{látható}} = U_{\ddot{u}z}$

látszólagos biztonság:

$$U_{\text{út méretezési}} / b_{\text{látszólagos}} = U_{\ddot{u}z}$$

valódi biztonság: $U_{\ddot{u}t} / b_{\text{valódi}} = U_{\ddot{u}z}$

A BIZTONSÁGI TÉNYEZŐ

<i>ipari frekvencián:</i>	b:	gáz	1,2 ... 2,0
		folyadék	1,5 ... 3,0
		szilárd	2,0 ... 5,0

<i>lökőfeszültségen:</i>	l:	gáz	1 ... 1,5
		folyadék	1 ... 2,0
		szilárd	2 ... 3,0

lökési tényező:

$$l = \frac{E_1}{\sqrt{2} E_{\text{ütváltó}}}$$

VÁKUUMBAN

$$\text{rot } \mathbf{E} = 0$$

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E}$$

$$\varepsilon_0 = 8,859 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$$

$$\mathbf{J} = 0$$

SZIGETELŐANYAG ESETÉN

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}$$

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}$$

$$\text{div}(\mathbf{J} + \partial \mathbf{D} / \partial t) = 0$$

$$dW/dV = 1/2 \mathbf{E} \mathbf{D}$$

AZ ELEKTROSZTATIKA GAUSS-TÉTELE

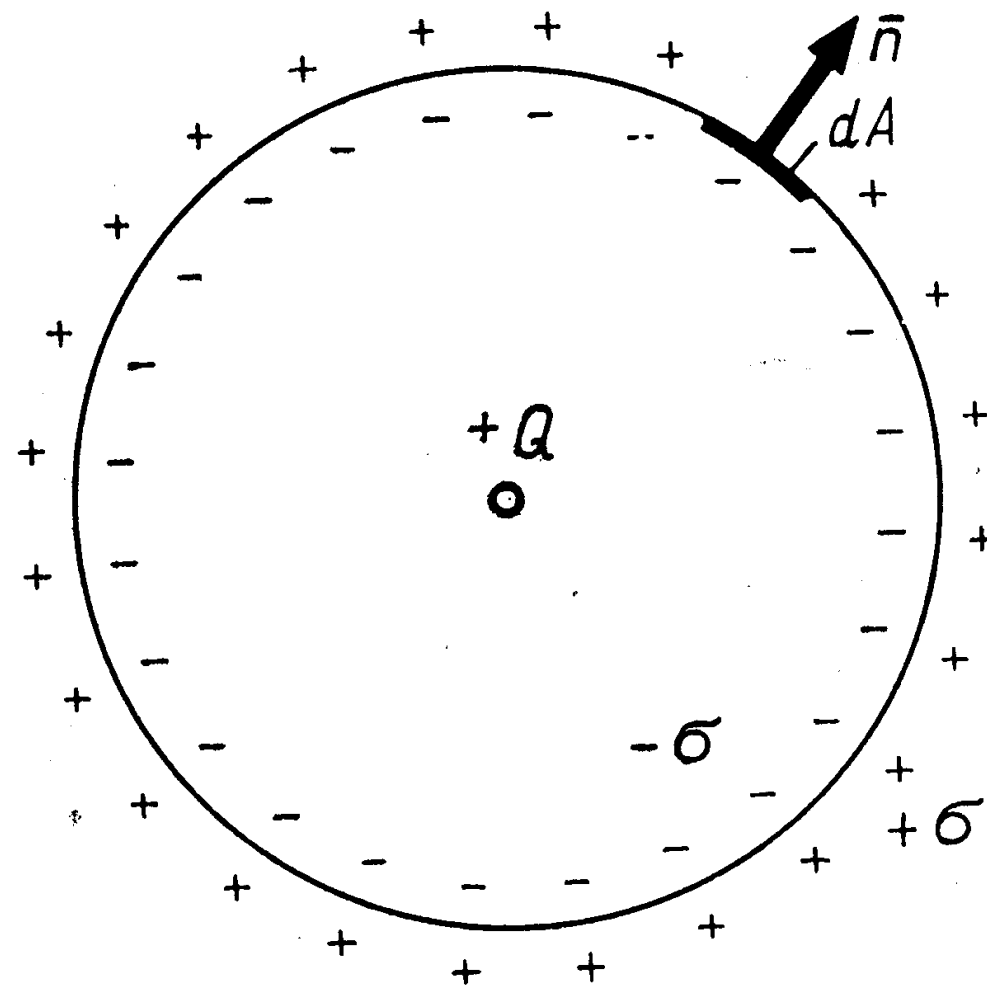
$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho$$

$$\oint_V \operatorname{div} \mathbf{D} dV = \oint_V \rho dV$$

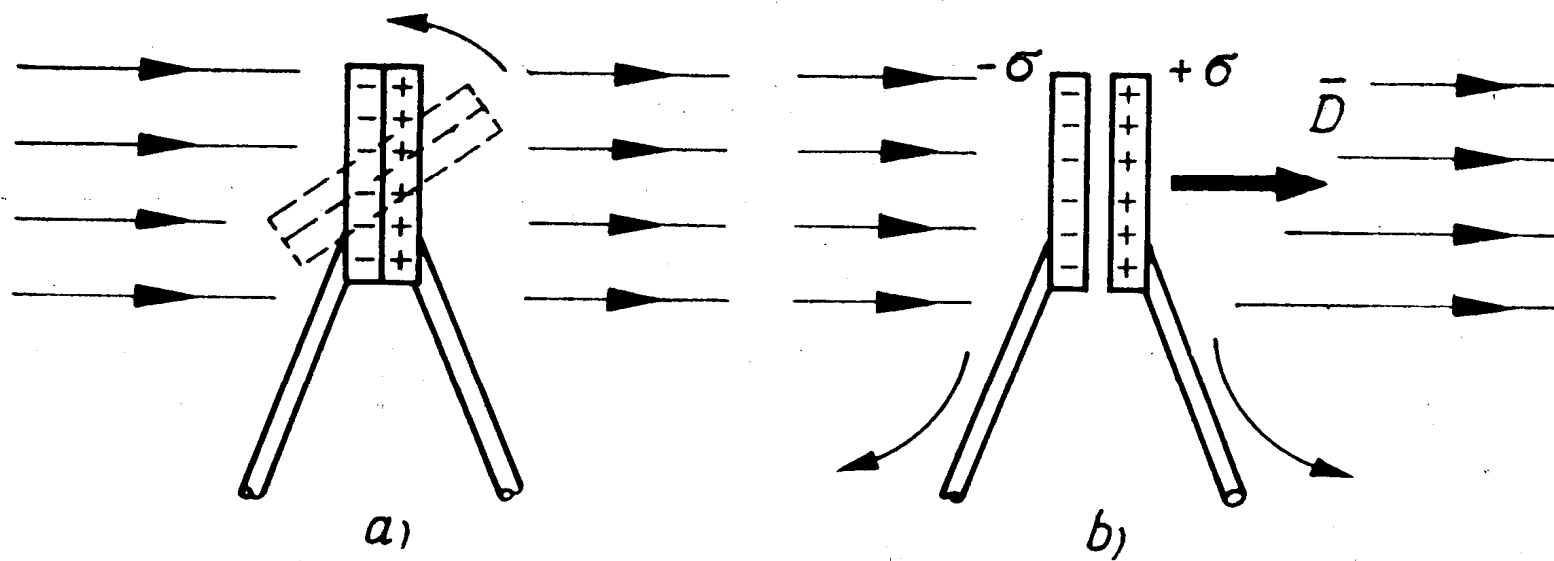
$$\oint_V \operatorname{div} \mathbf{D} dV = \oint_A \mathbf{D} dA$$

$$\oint_V \rho dV = Q$$

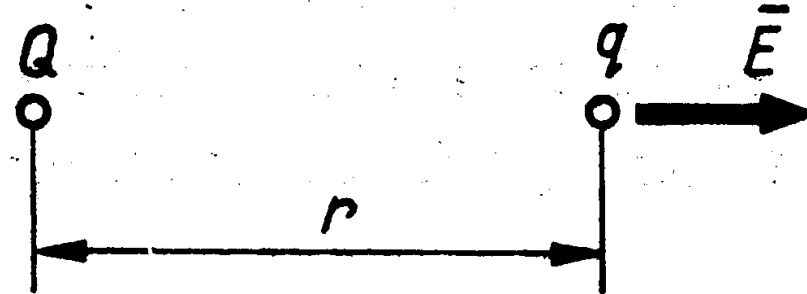
$$\oint_A \mathbf{D} dA = Q$$



AZ ELTOLÁS SZEMLÉLTETÉSE



A TÉRERŐSSÉG ÉS AZ ERŐHATÁS



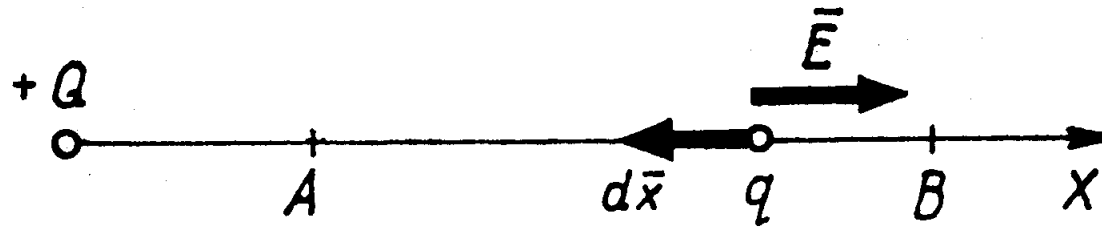
$$\mathbf{E} = \mathbf{D} / \varepsilon_0 \varepsilon \rightarrow \mathbf{E} = Q / A \varepsilon_0 \varepsilon = Q / 4 \pi \varepsilon \varepsilon_0 r^2$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{E} q$$

$$\mathbf{F} = k Qq / r^2$$

COULOMB-törvény

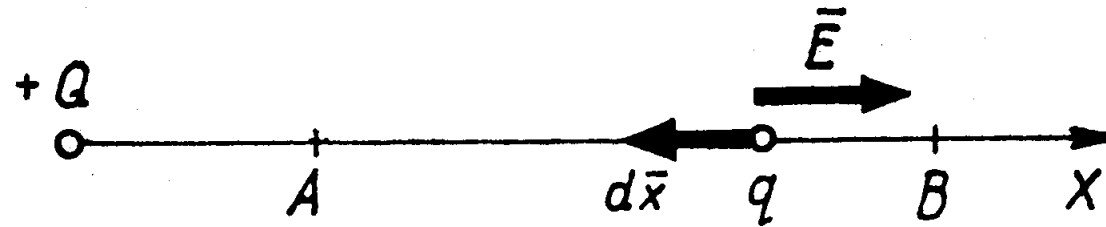
ENERGIA ÉS POTENCIÁL



$$dW = -q\mathbf{E} \, d\mathbf{x}$$

$$W_{AB} = -q \int_B^A \mathbf{E} \, d\mathbf{x}$$

ENERGIA ÉS POTENCIÁL

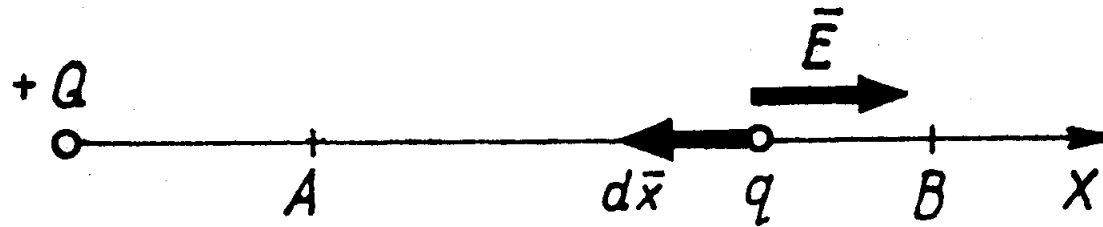


$$W_{AB} = W_A - W_B$$

$$W_{AB} = -q \int_B^A \mathbf{E} \, d\mathbf{x} = qU$$

$$U_{AB} = W / q = - \int_B^A \mathbf{E} \, d\mathbf{x}$$

ENERGIA ÉS POTENCIÁL



$$U_{AB} = W / q = - \int_B^A \mathbf{E} \, d\mathbf{x}$$

$$\mathbf{E} = - dU/d\mathbf{x} = - \text{grad } U$$

$$\mathbf{E} = - (\partial U / \partial x \, \mathbf{i} + \partial U / \partial y \, \mathbf{j} + \partial U / \partial z \, \mathbf{k})$$

$$[E] = \text{V} / \text{m}$$

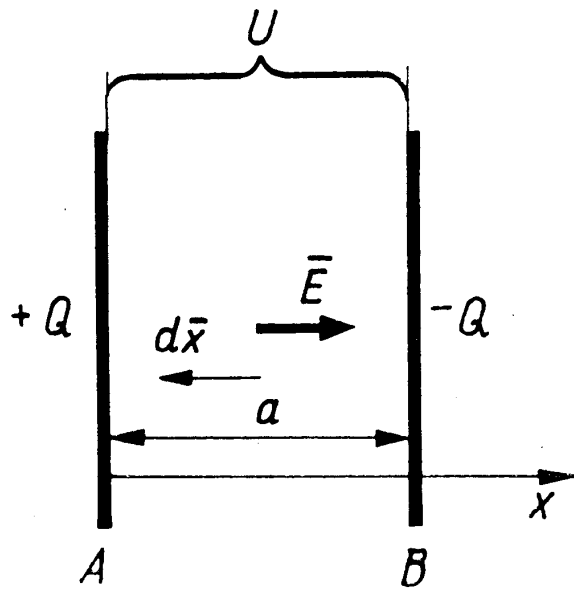
LAPLACE-POISSON EGYENLET

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E} = - \varepsilon_0 \varepsilon \operatorname{grad} U$$

$$- \varepsilon_0 \varepsilon \operatorname{div} \operatorname{grad} U = \rho$$

$$\Delta U = - \rho / \varepsilon_0 \varepsilon$$

SÍKKONDENZÁTOR



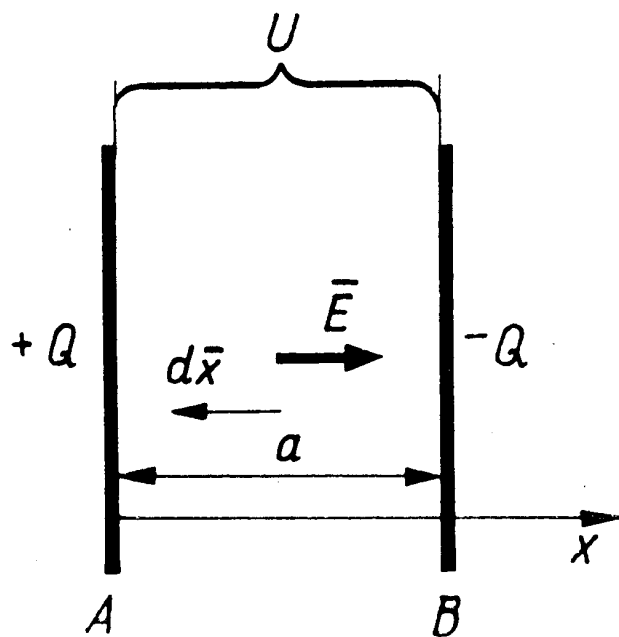
$$DA = Q$$

$$E = Q / \epsilon_0 \epsilon A$$

$$U_{AB} = Q / (\epsilon_0 \epsilon A) \int dx = Q a / \epsilon_0 \epsilon A$$

$$Q = \epsilon_0 \epsilon A U / a$$

SÍKKONDENZÁTOR KAPACITÁSA



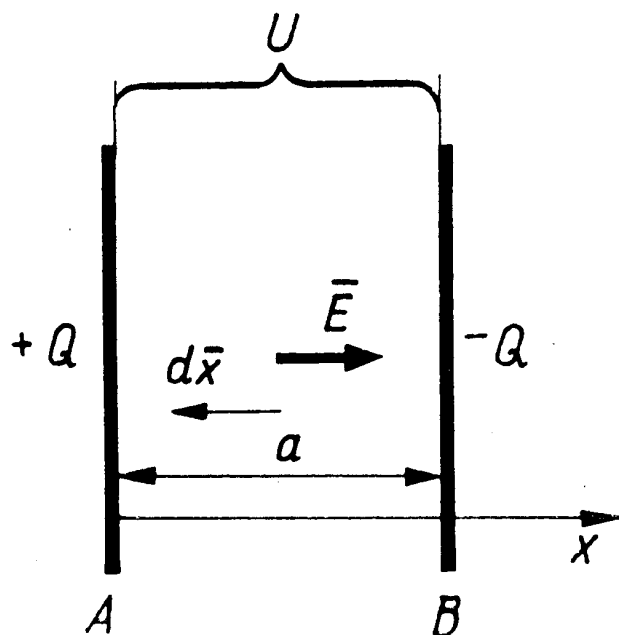
$$Q = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 A}{a} U$$



$$Q = CU$$

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 A}{a}$$

SÍKKONDENZÁTOR KAPACITÁSA

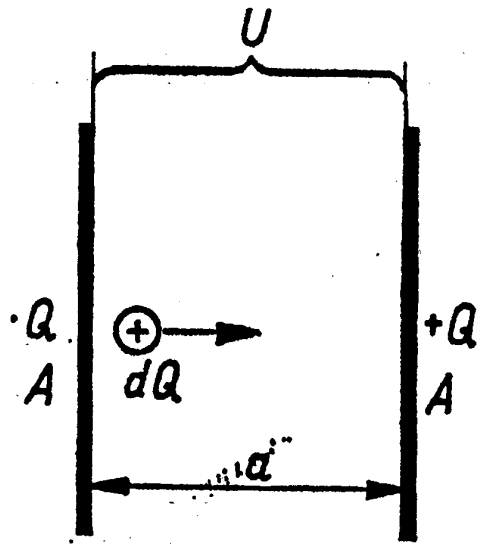


$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 A}{a}$$

$$[C] = \text{As} / \text{V} = \text{F (farad)}$$

$$E = U / a$$

KONDENZÁTOR ENERGIÁJA



$$dW = U dQ$$

$$dQ = C dU$$

$$dW = C U dU$$

$$W = \int_0^U C U dU = \frac{1}{2} C U^2$$

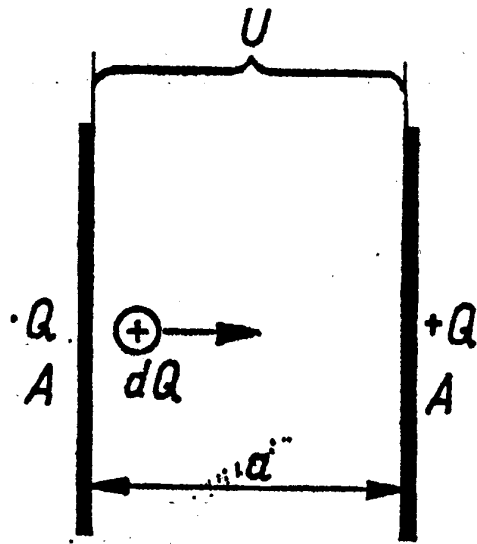
KONDENZÁTOR ENERGIÁJA

$$W = \frac{1}{2} C U^2$$

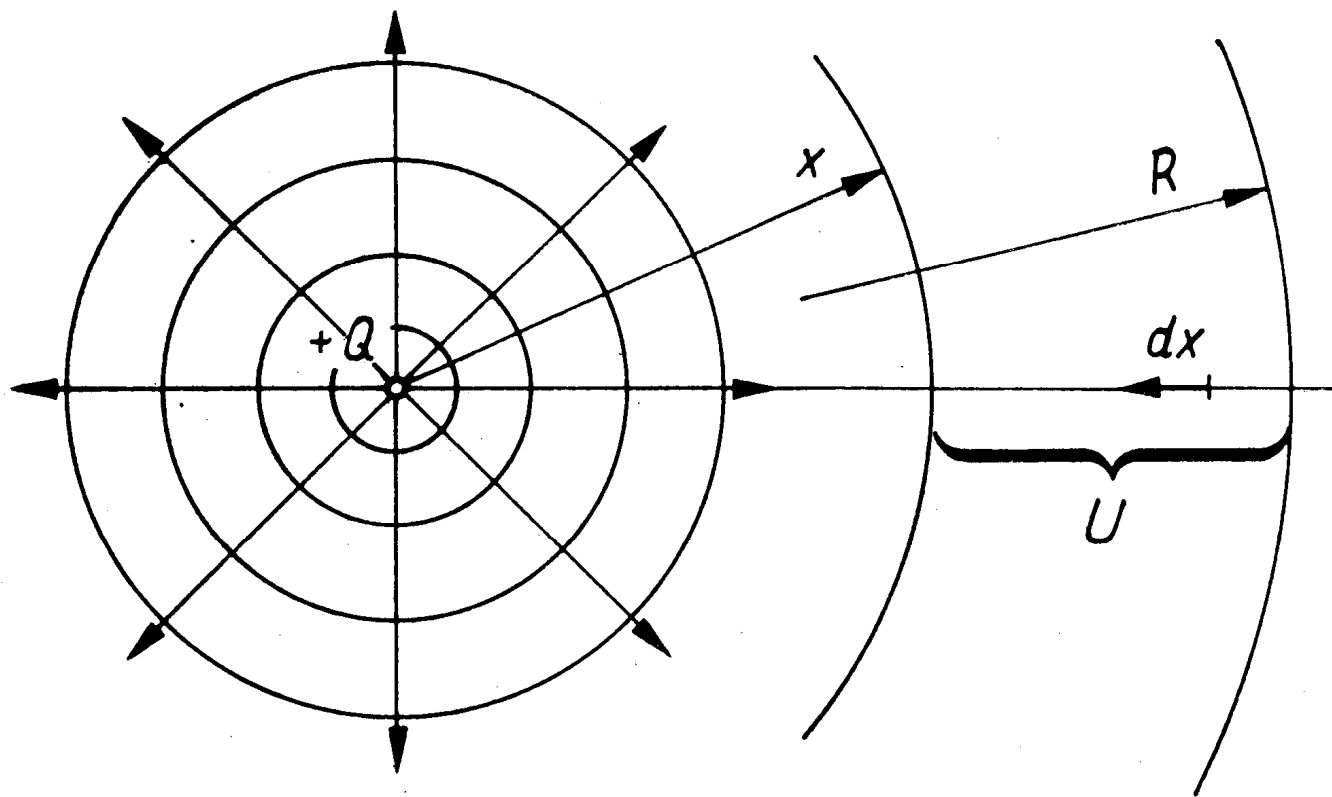
$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 A}{a} \quad \text{és} \quad U = E a$$

$$W = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2 V$$

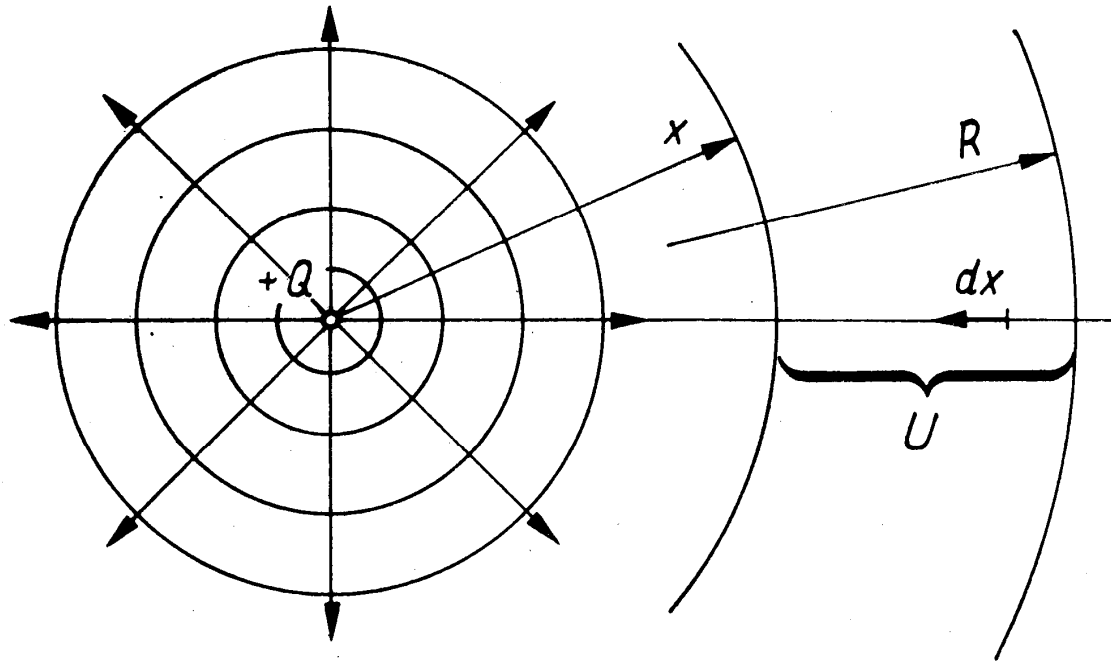
$$W = \frac{1}{2} D E V$$



PONTSZERŰ TÖLTÉS ERŐTERE



PONTSZERŰ TÖLTÉS ERŐTERE



Potenciál:

$$U = - \int_R^x E \, dx = \frac{Q}{4 \pi \epsilon \epsilon_0} \int_x^R \frac{dx}{x^2}$$

$$U = \frac{Q}{4 \pi \epsilon \epsilon_0} \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{R} \right) \quad R \rightarrow \infty$$

Gauss törvény

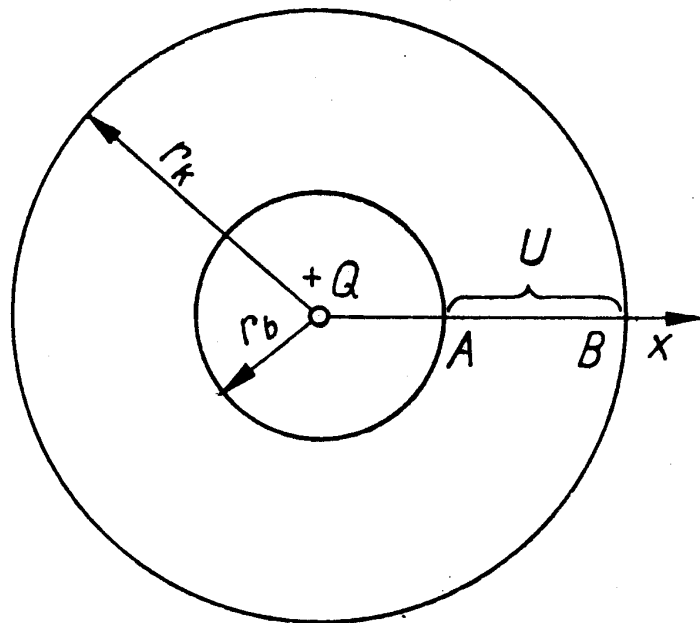
$$\oint_A \mathbf{D} \, dA = Q$$

$$D \, 4 \pi x^2 = Q$$

$$E = \frac{Q}{4 \pi \epsilon \epsilon_0} \frac{1}{x^2}$$

$$U = \frac{1}{4 \pi \epsilon \epsilon_0} \frac{Q}{x}$$

PONTSZERŰ TÖLTÉSEKRE VISSZAVEZETHETŐ ERŐTEREK



Adott: U , geometria

Kérdés: E , ha $r_b \leq x \leq r_k$

$$U = \frac{Q}{4 \pi \varepsilon \varepsilon_0} \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{R} \right)$$

$$U = \frac{Q}{4 \pi \varepsilon \varepsilon_0} \left(\frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_k} \right)$$

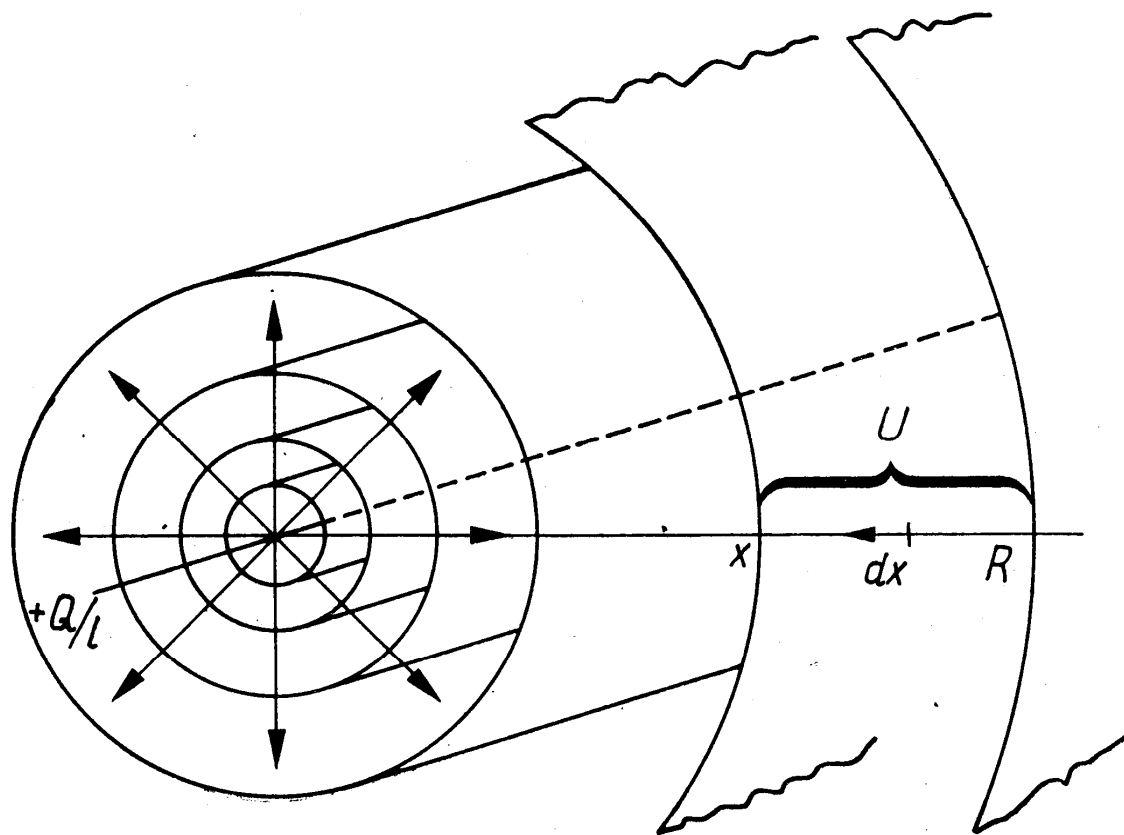
$$Q = 4 \pi \varepsilon \varepsilon_0 \frac{r_k r_b}{r_k - r_b} U \quad (Q = C U)$$

$$E = \frac{Q}{4 \pi \varepsilon \varepsilon_0} \frac{1}{x^2}$$

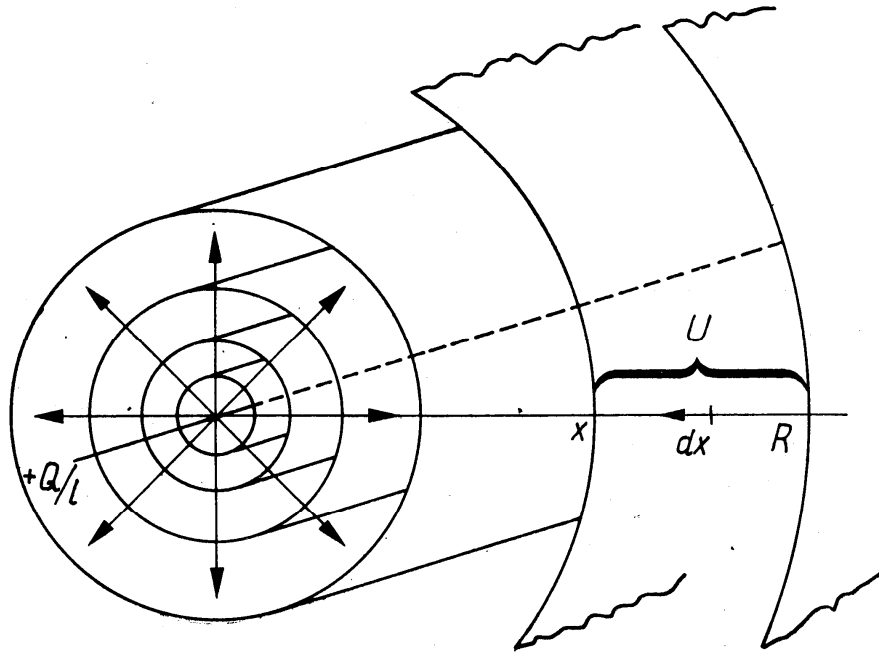
$$E(x) = U \frac{r_k r_b}{r_k - r_b} \frac{1}{x^2}$$

$$E_{\max} = U \frac{1}{r_k - r_b} \frac{r_k}{r_b}$$

VÉGTELEN HOSSZÚ EGYENES VONALTÖLTÉS ERŐTERE



VÉGTELEN HOSSZÚ EGYENES VONALTÖLTÉS ERŐTERE



Gauss
törvény

$$\oint_A \mathbf{D} \, dA = Q$$

$$D \, 2 \pi x l = Q$$

$$E = \frac{Q}{2 \pi \epsilon \epsilon_0 l} \frac{1}{x}$$

Potenciál:

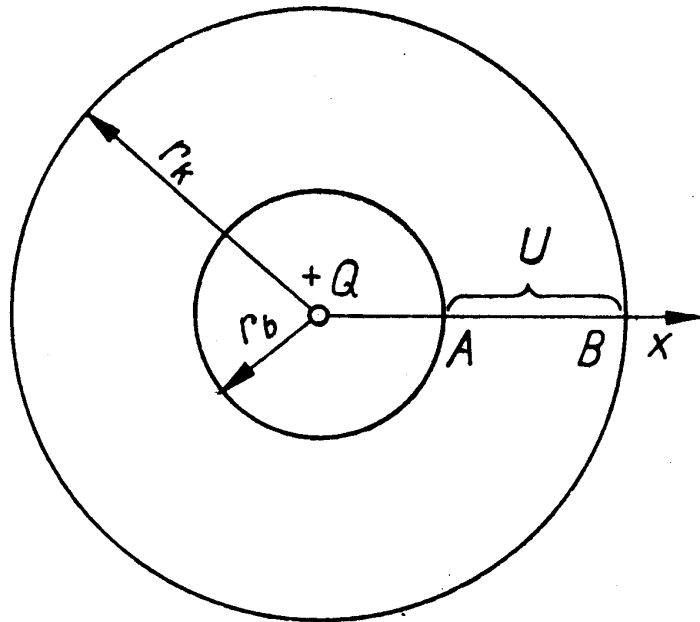
$$U = - \int_R^x E \, dx$$

$$U = - \frac{Q}{2 \pi \epsilon \epsilon_0 l} \int_R^x \frac{dx}{x} = \frac{Q}{2 \pi \epsilon \epsilon_0 l} \ln \frac{R}{x}$$

$R \rightarrow h$

Értelmetlen!

VÉGTELEN EGYENES VONALTÖLTÉSRE VISSZAVEZETHETŐ ERŐTEREK



Adott: U , geometria

Kérdés: E , ha $r_b \leq x \leq r_k$

$$U = \frac{Q}{2 \pi \epsilon \epsilon_0 l} \ln \frac{r_k}{r_b}$$

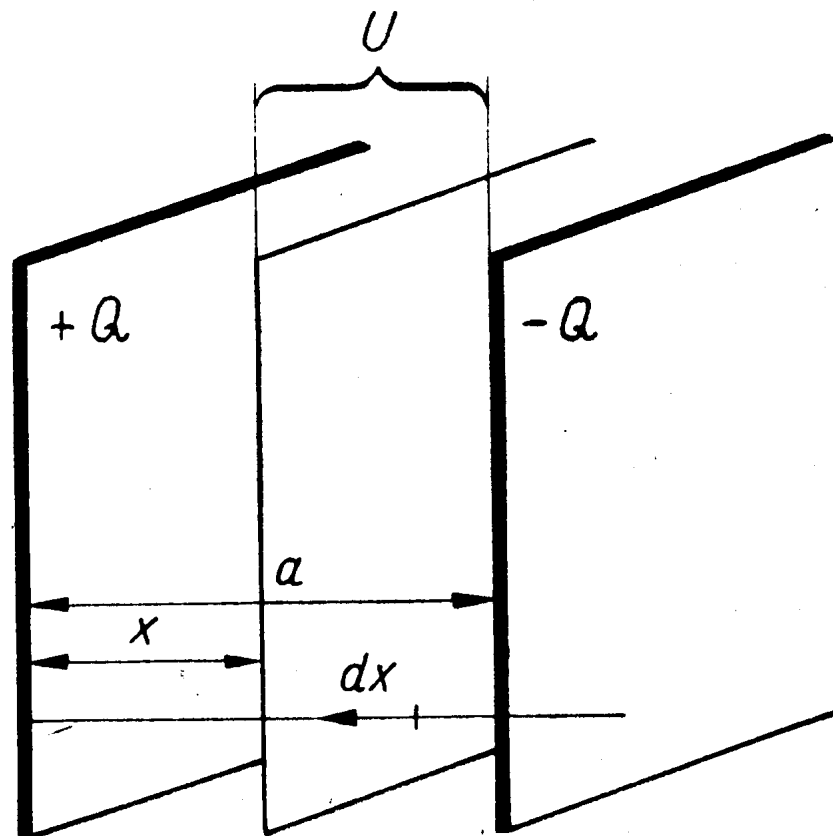
$$U = \frac{Q}{2 \pi \epsilon \epsilon_0 l} \left(\ln \frac{r_k}{r_b} - \ln \frac{r_k}{r_k} \right)$$

$$Q = U 2 \pi \epsilon \epsilon_0 l \frac{1}{\ln \frac{r_k}{r_b}} \quad (Q = C U)$$

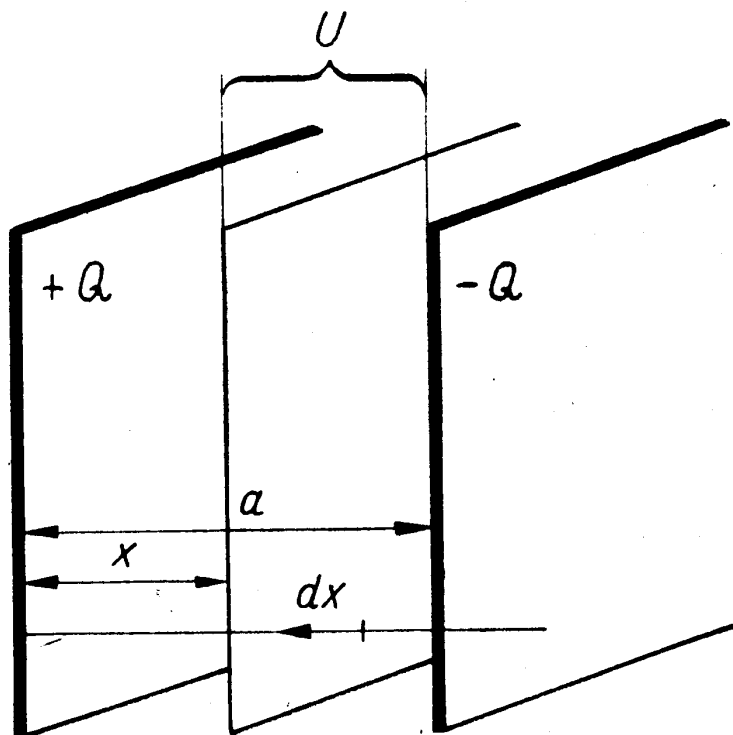
$$E(x) = \frac{Q}{2 \pi \epsilon \epsilon_0 l} \frac{1}{x} = \frac{U}{x \ln \frac{r_k}{r_b}}$$

$$E_{max} = \frac{U}{r_b \ln \frac{r_k}{r_b}}$$

VÉGTELEN KITERJEDÉSŰ TÖLTÖTT SÍK



VÉGTELEN KITERJEDÉSŰ TÖLTÖTT SÍK



Gauss
törvény

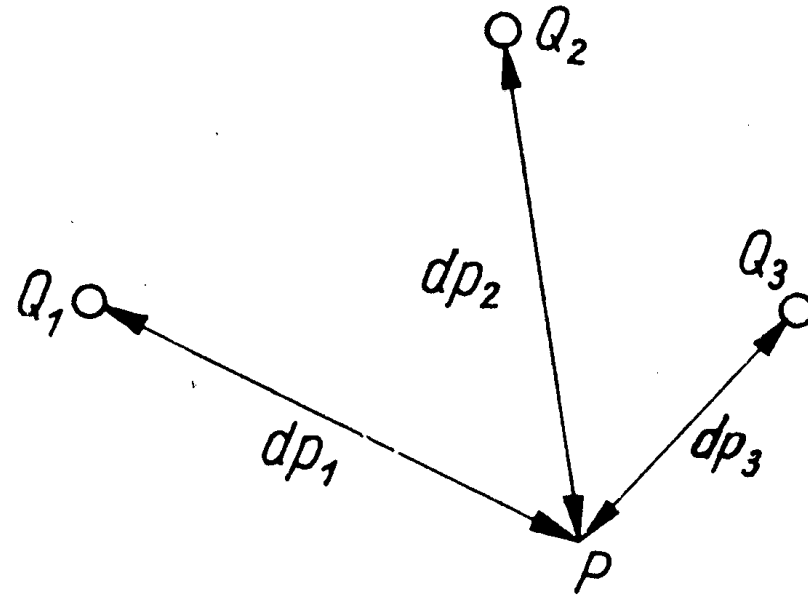
$$\oint_A \mathbf{D} \, dA = Q$$

$$D A = Q$$

$$E = \frac{Q}{\epsilon \epsilon_0 A}$$

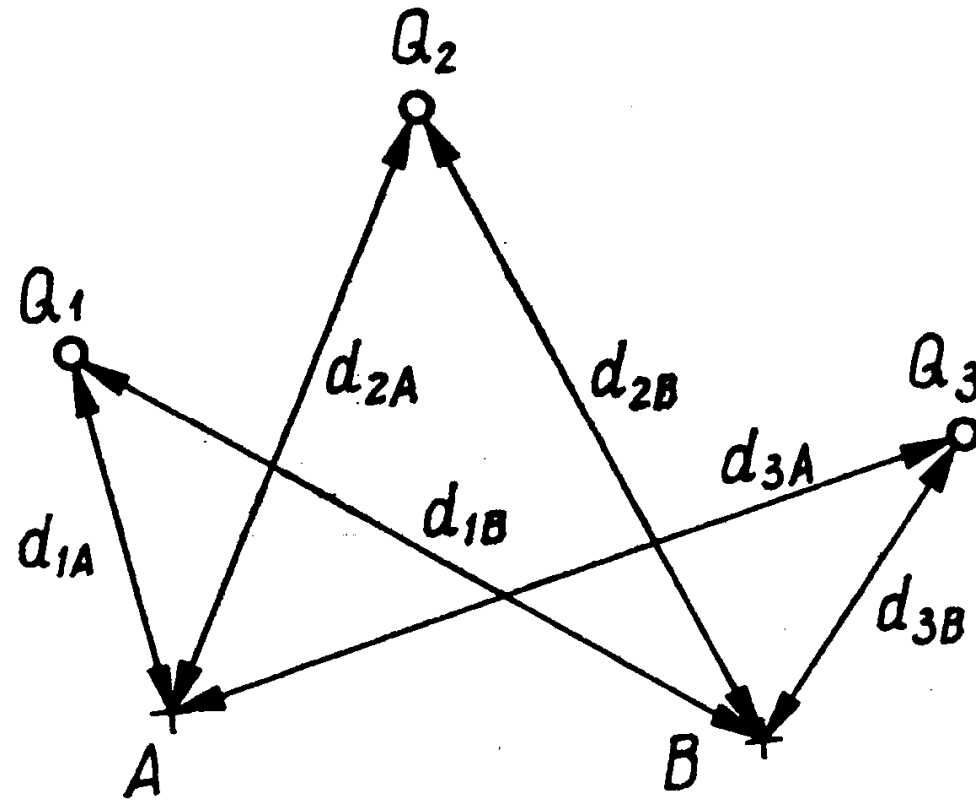
$$U = - \int_a^x E \, dx = \frac{Q}{\epsilon \epsilon_0 A} (a - x)$$

TÖBB PONTSZERŰ TÖLTÉSBŐL ÁLLÓ RENDSZER



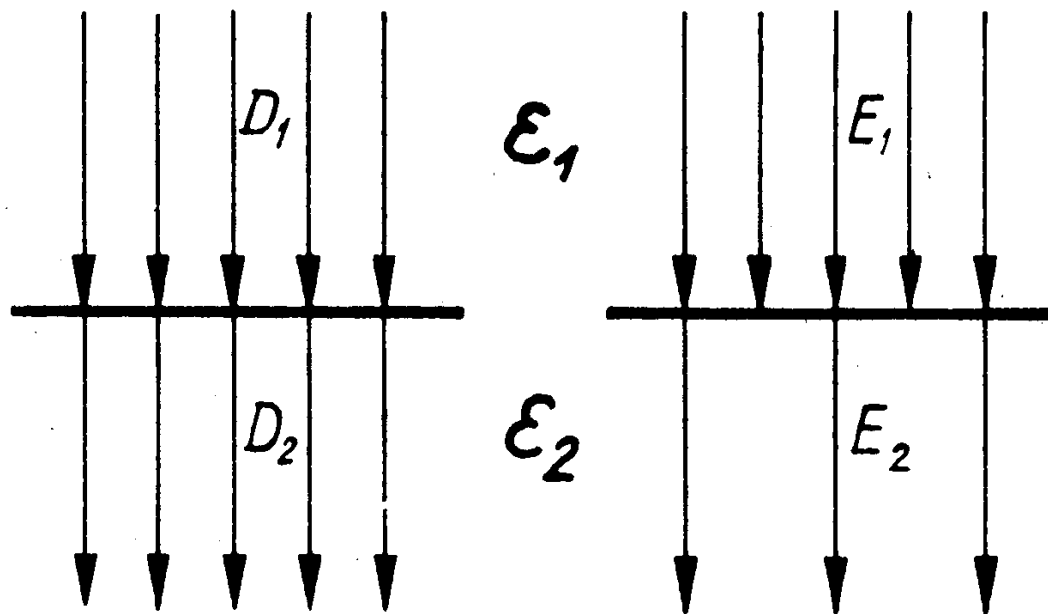
$$U_P = \frac{1}{4 \pi \epsilon \epsilon_o} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{dp_i}$$

TÖBB PONTSZERŰ TÖLTÉSBŐL ÁLLÓ RENDSZER



$$U_{AB} = \frac{1}{4 \pi \epsilon \epsilon_o} \sum_{i=1}^n Q_i \left(\frac{1}{dA_i} - \frac{1}{dB_i} \right)$$

ERŐTEREK TÖBBFÉLE SZIGETELŐANYAGGAL



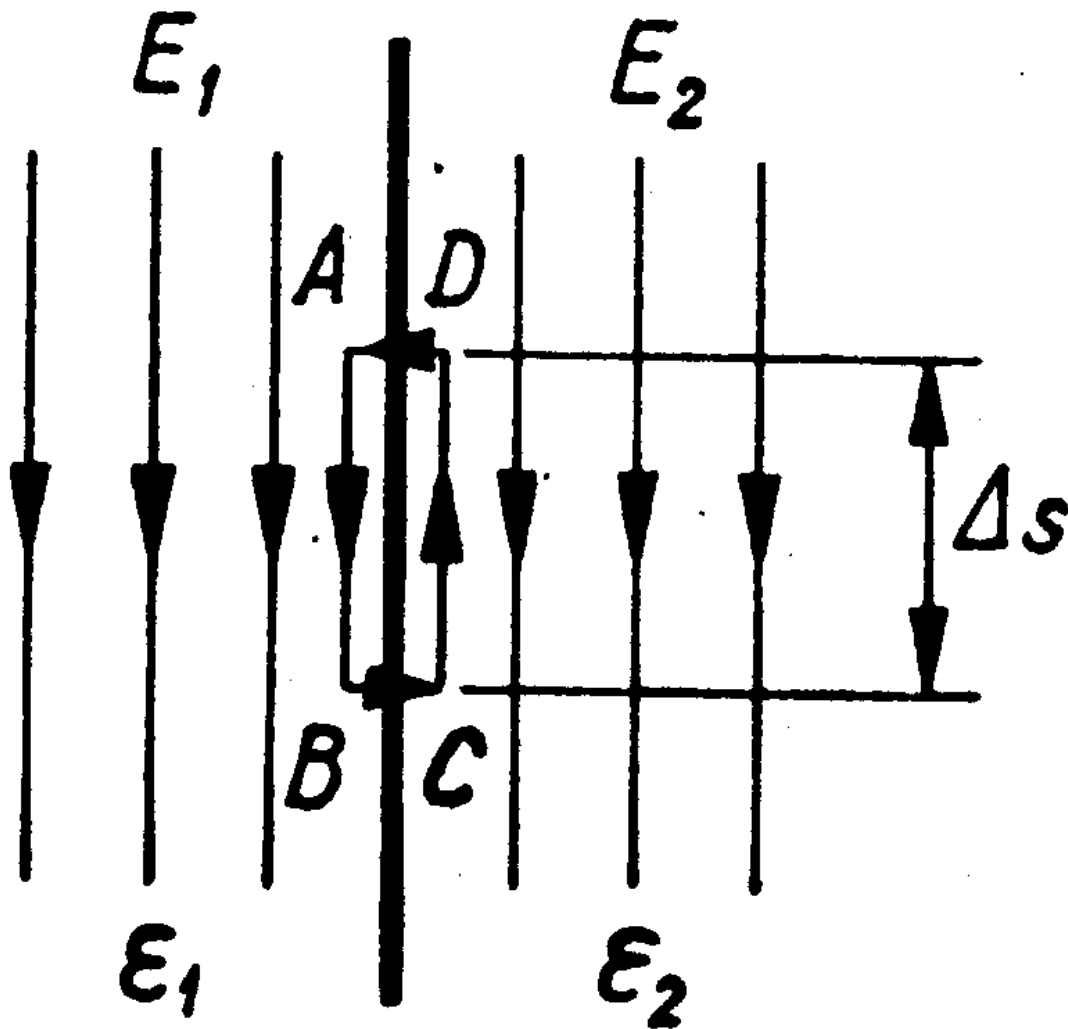
$$\oint_A \mathbf{D} \, dA = Q$$

$$\mathbf{D}_1 = \mathbf{D}_2$$

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon \mathbf{E}$$

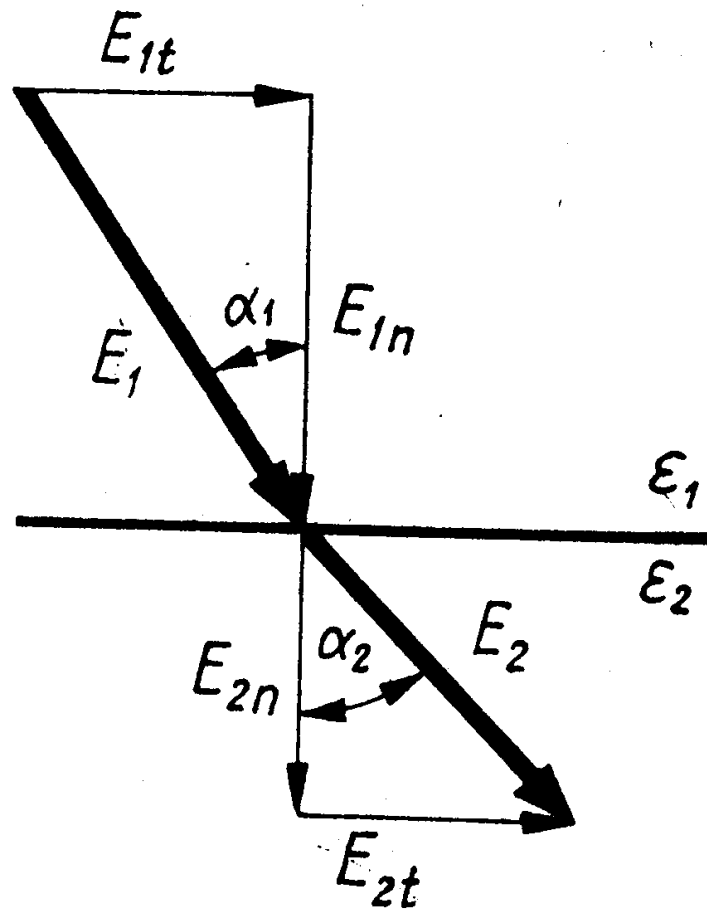
$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$$

ERŐTEREK TÖBBFÉLE SZIGETELŐANYAGGAL



$$E_1 = E_2$$

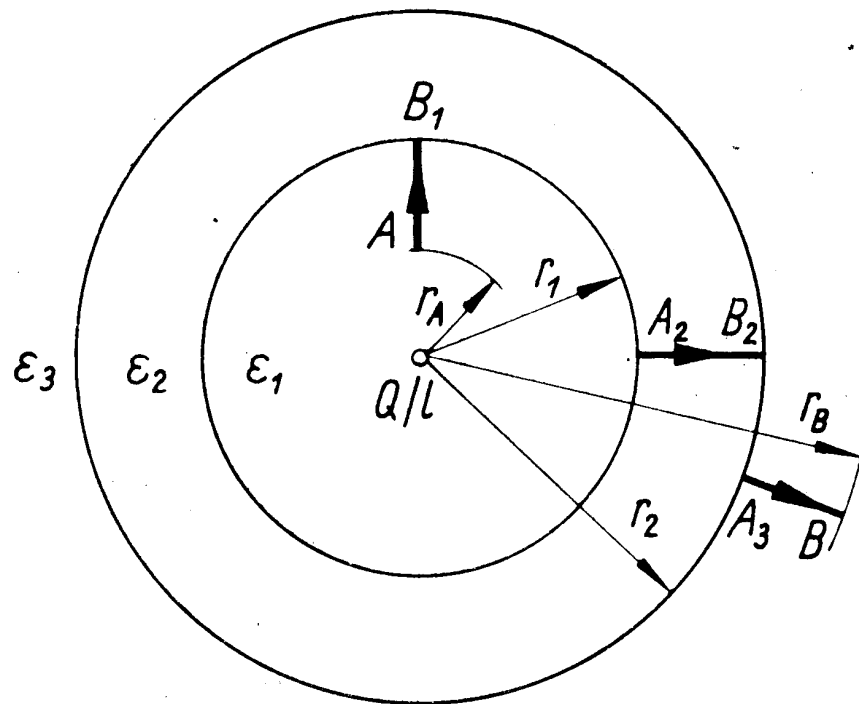
ERŐTEREK TÖBBFÉLE SZIGETELŐANYAGGAL



$$E_{1t} = E_{2t} \quad \text{és} \quad \frac{E_{1n}}{E_{2n}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{E_{1t}}{E_{1n}} \frac{E_{2n}}{E_{2t}} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$$

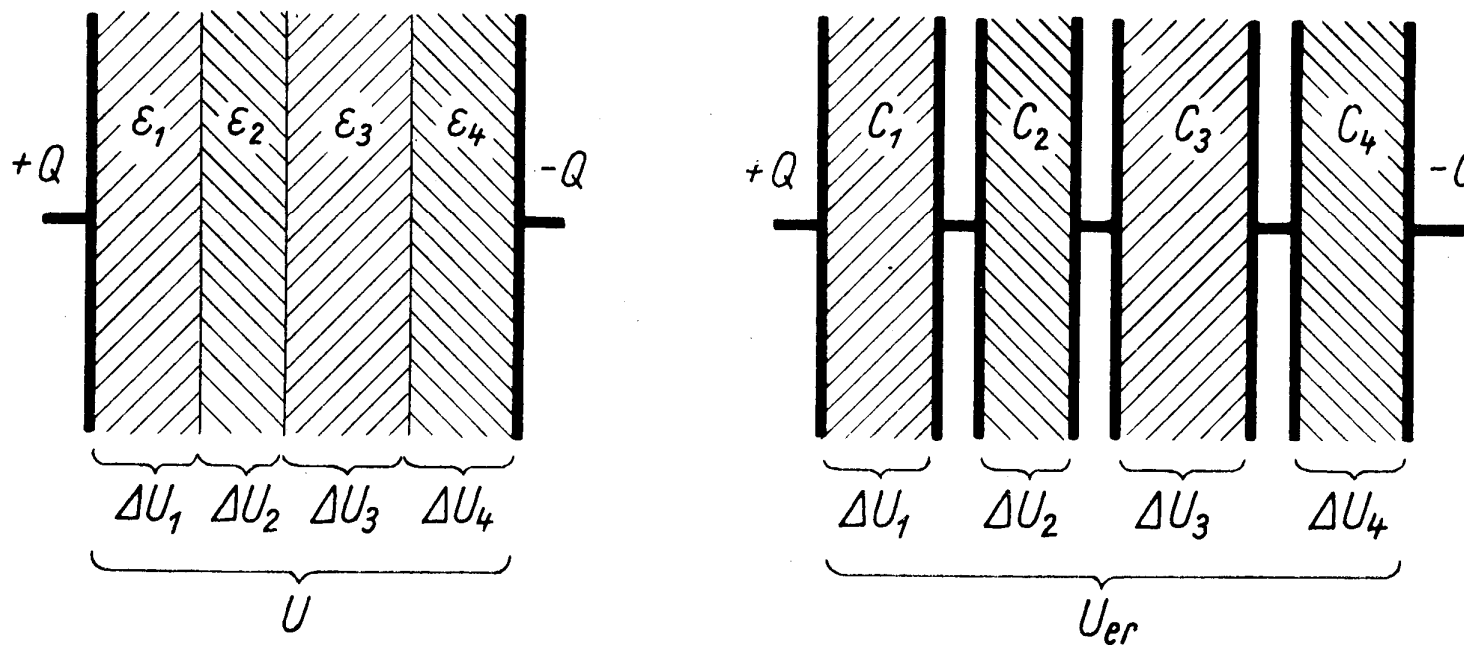
KERESZTIRÁNYÚ HENGERS RÉTEGEZÉS



$$U = \frac{Q}{2 \pi \epsilon \epsilon_0 l} \ln \frac{R}{x}$$

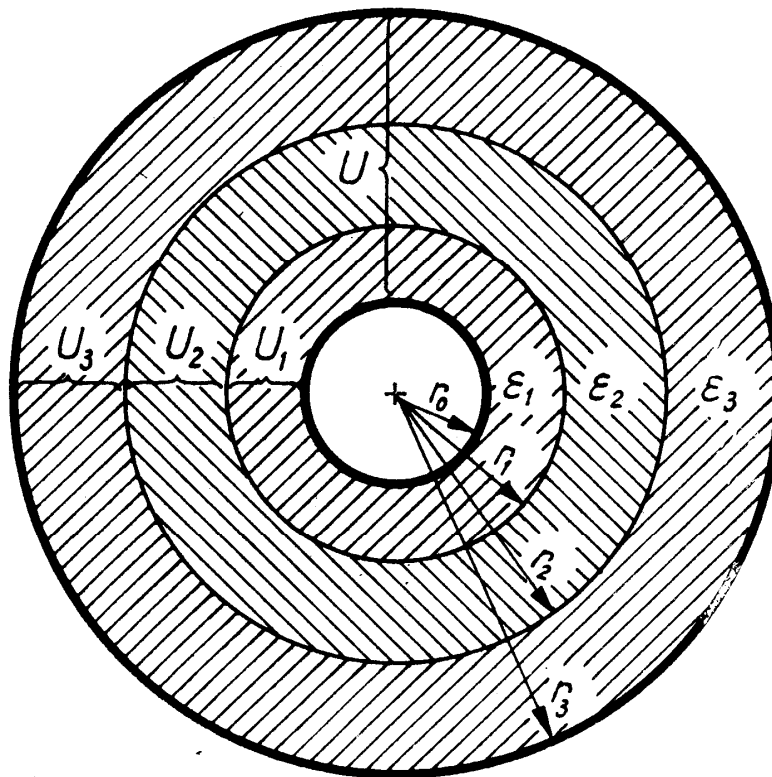
$$U_{AB} = \frac{Q}{2 \pi \epsilon_0 l} \left(\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_A} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_3} \ln \frac{r_B}{r_2} \right)$$

KERESZTIRÁNYÚ RÉTEGEZÉS



$$Q = C_1 \Delta U_1 = C_2 \Delta U_2 = C_3 \Delta U_3 = \dots = C_{er} \Delta U_{er}$$

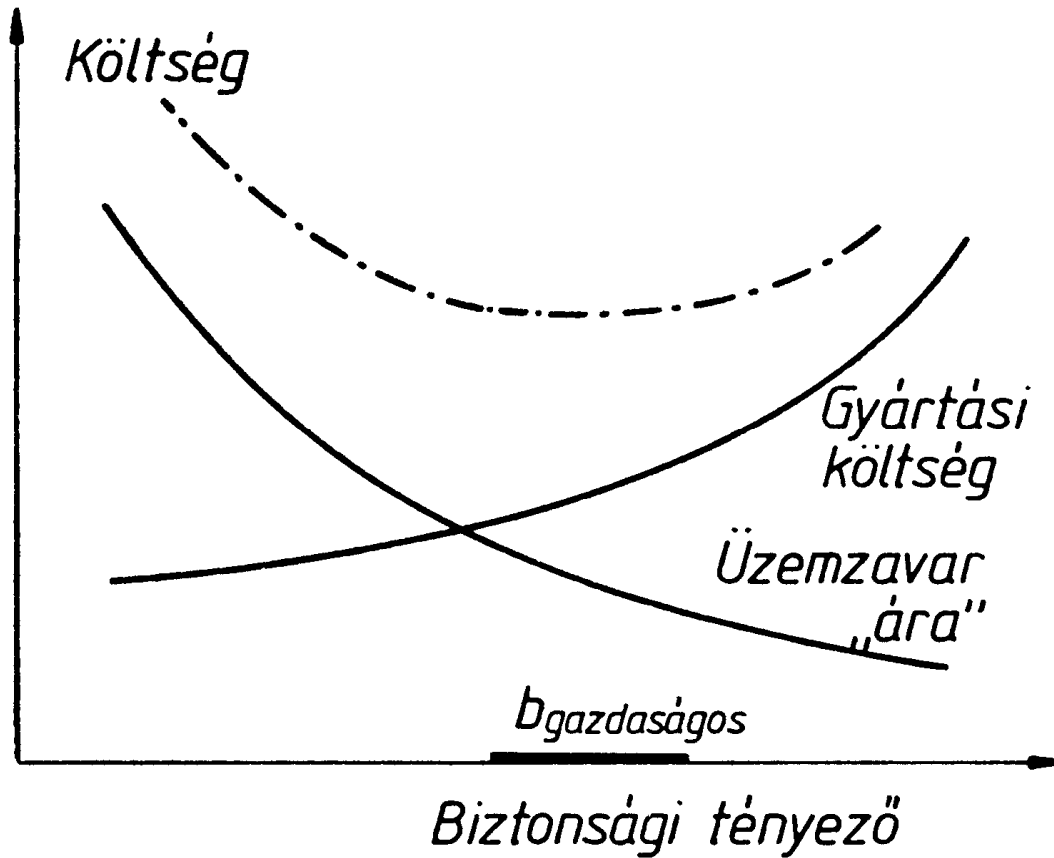
KÉT KÖZÖS TENGELYŰ HENGER RÉTEGEZETT SZIGETELÉSSSEL



$$Q = C_1 \Delta U_1 = C_2 \Delta U_2 = C_3 \Delta U_3 = C_{er} \Delta U_{er}$$

Szigetelések gazdaságos kihasználása

SZIGETELÉSEK GAZDASÁGOSSÁGA



$$b_x = U_{\text{üt}} / U_x$$

SZIGETELÉS GAZDASÁGOSSÁGA

- Szigetelés és a villamos gép ára
- Szigetelés üzembiztonsága
- Szigetelés élettartama

BIZTONSÁGI TÉNYEZŐ

- Nem a vizsgált anyagot építjük be
- Előre nem látható igénybevételek
- Labormérés körülményei eltérnek az üzemitől
- Gazdaságosság

Névleges feszültség	Műanyag szigetelésű kábelek árában a szigetelésre jutó részarány
10 kV	10 %
20 kV	15 %
35 kV	20 %
120 kV	38 %

A SZIGETELÉS KIHASZNÁLTSÁGA

Akkor jó, ha minden pontban

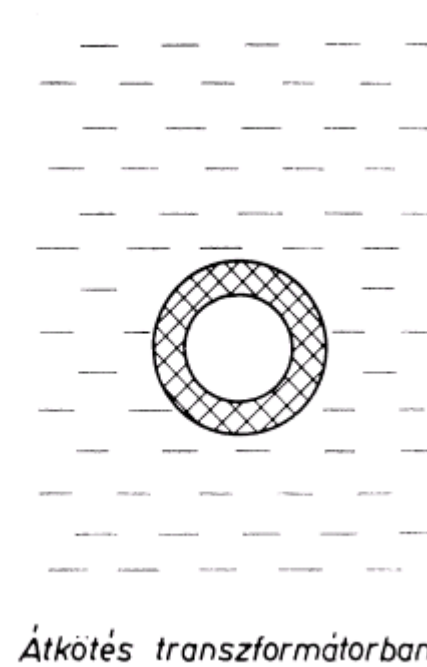
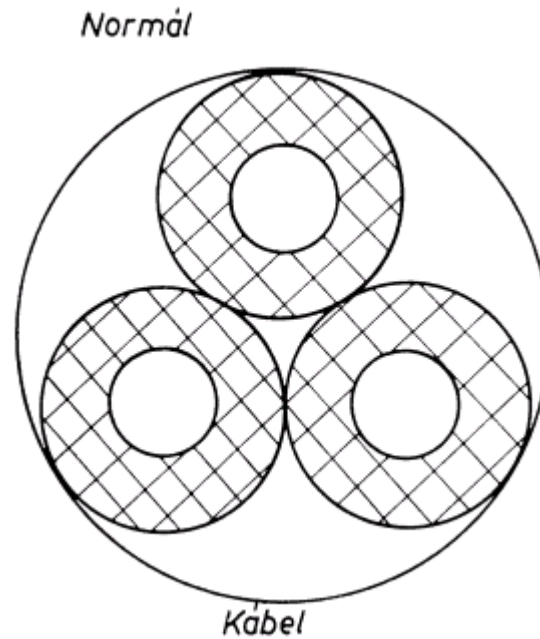
$$E_{\text{üzemi}} = E_{\text{megengedett}}$$

Ez a gyakorlatban lehetetlen!

A SZIGETELÉSEK JOBB KIHASZNÁLTSÁGÁT ELŐSEGÍTŐ MÓDSZEREK

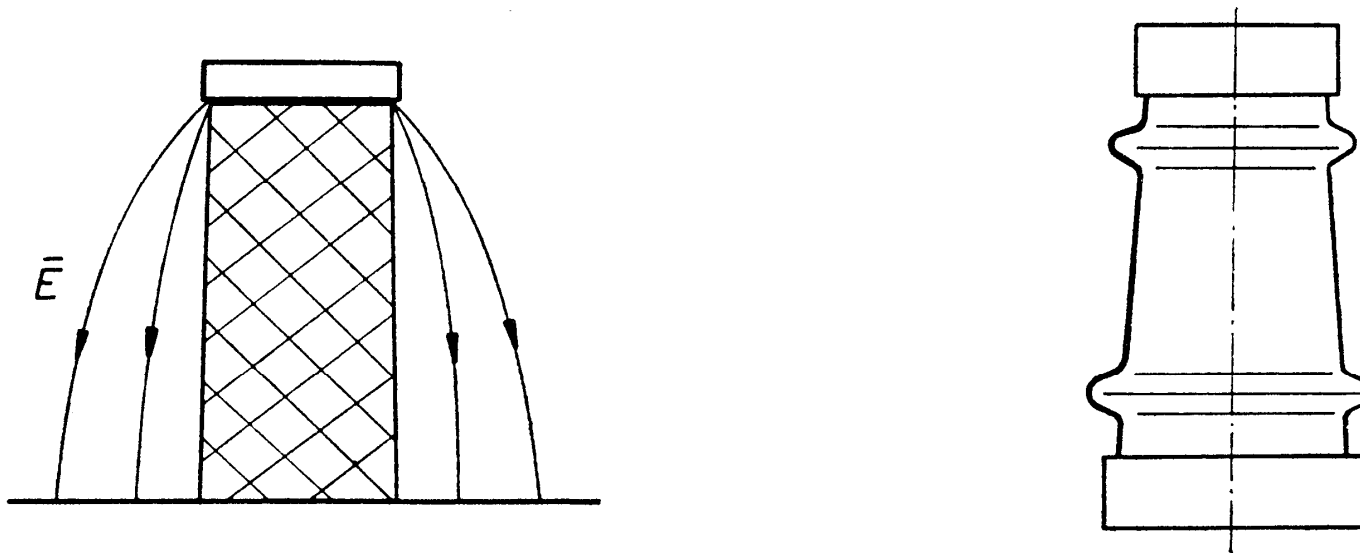
1) Kedvező alaptípus választása

A SZIGETELÉSEK TÍPUSAI



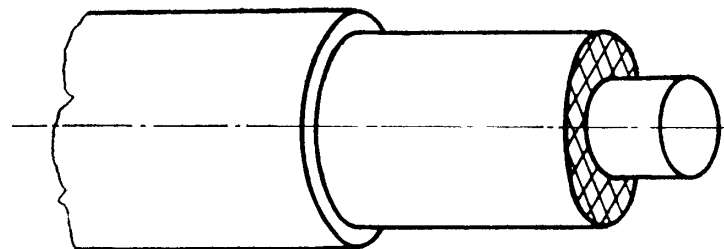
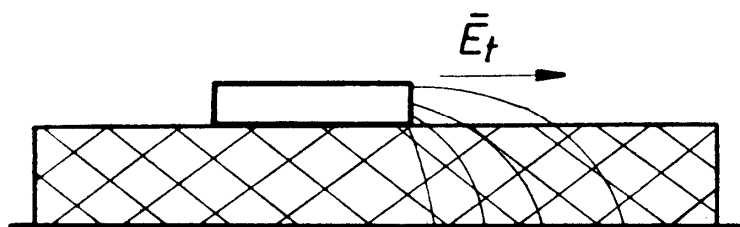
Beágyazott típusú szigetelés

A SZIGETELÉSEK TÍPUSAI



Támszigetelő típusú szigetelés

A SZIGETELÉSEK TÍPUSAI

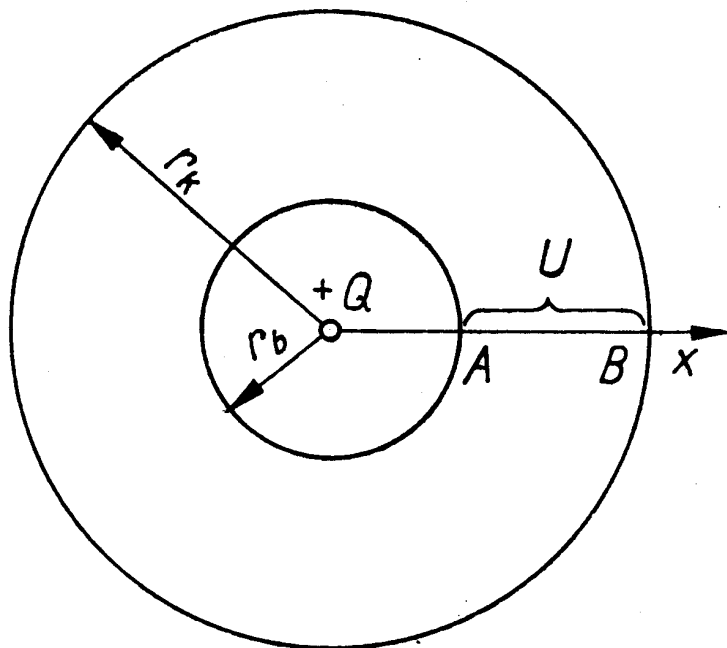


Részben beágyazott típusú szigetelés

A SZIGETELÉSEK JOBB KIHASZNÁLTSÁGÁT ELŐSEGÍTŐ MÓDSZEREK

- 1) Kedvező alaptípus választása
- 2) Jól számítható elrendezés
- 3) Hengeres erőterben: - optimális sugárarány választása
- rétegzés

A LEGJOBB KIHASZNÁLÁS FELTÉTELE PONTSZERŰ TÖLTÉSRE VISSZAVEZETHETŐ ERŐTÉRBEN



$$E_{max} = U \frac{1}{r_k - r_b} \frac{r_k}{r_b} \quad r_k = \text{áll}$$

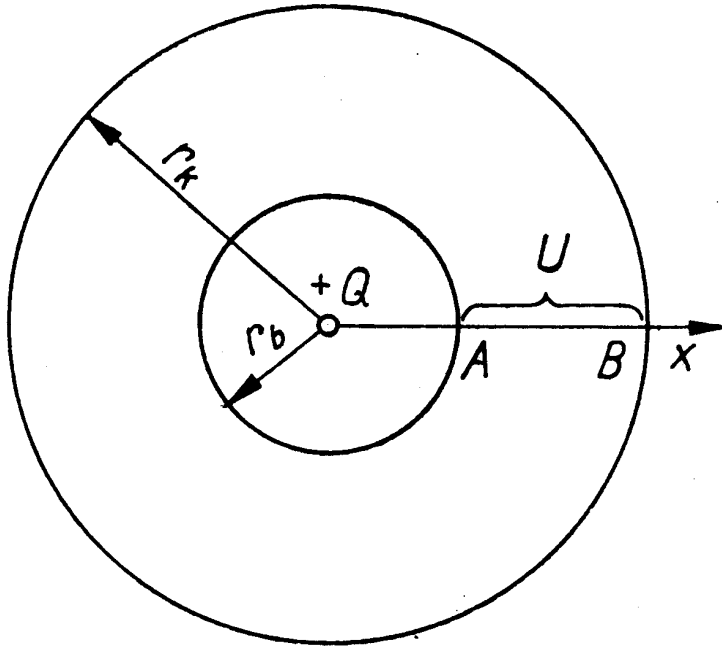
$$U = E_{max} \frac{1}{r_k} r_b (r_k - r_b) \quad /' r_b$$

$$U' = E_{max} \frac{1}{r_k} [r_k - r_b + r_b(-1)]$$

$$r_k = 2r_b$$

$$\frac{E_{max}}{E_{min}} = \frac{r_k^2}{r_b^2} = 4$$

A LEGJOBB KIHASZNÁLÁS FELTÉTELE HENGERS ERŐTÉR BEN



$$U = E_{max} r_b \ln \frac{r_k}{r_b}$$

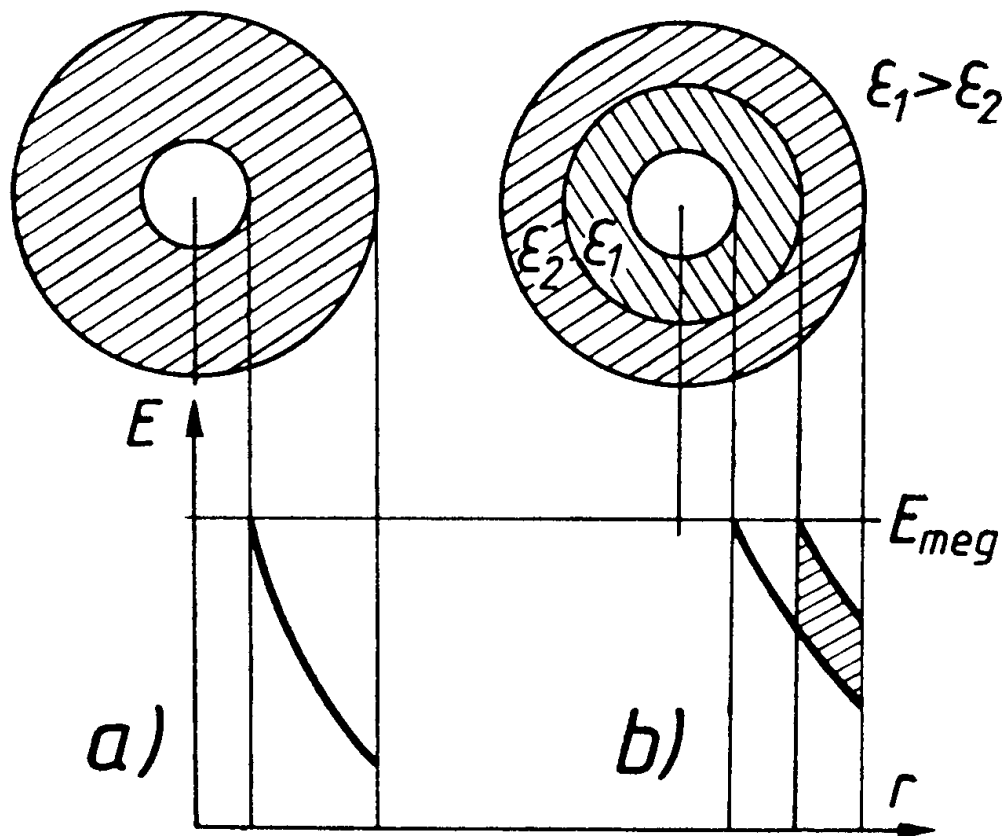
$$r_k = \text{áll}$$

$$U' = 0$$

$$\frac{r_k}{r_b} = e$$

$$\frac{E_{max}}{E_{min}} = \frac{r_k}{r_b} = e$$

A SZIGETELÉSEK JOBB KIHASZNÁLÁSÁT ELŐSEGÍTŐ MÓDSZEREK

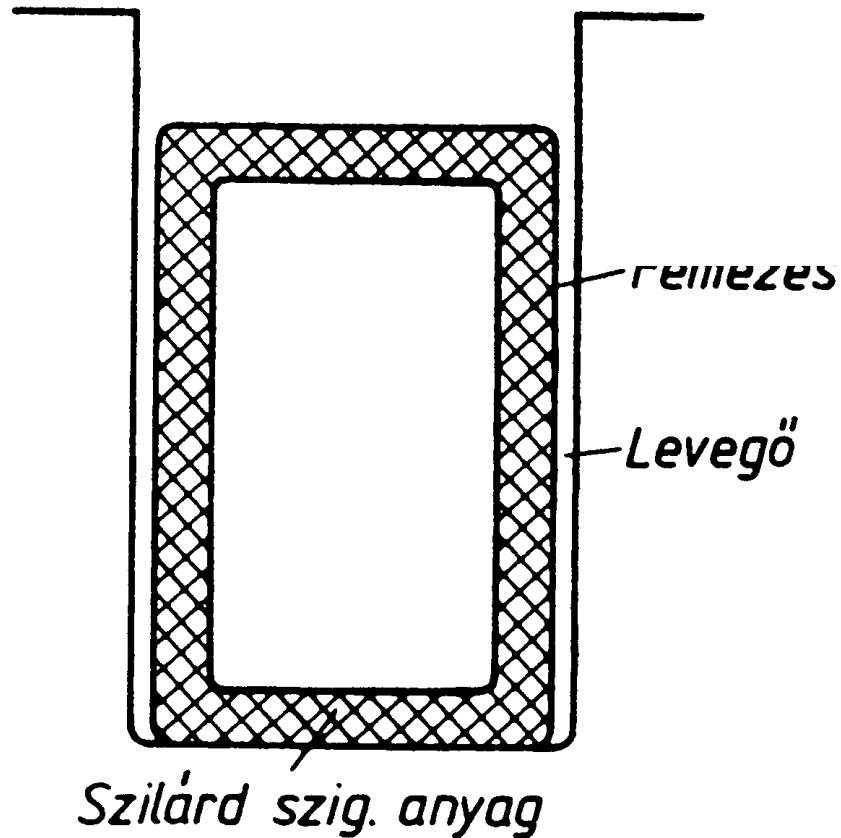


$$E \epsilon r = \text{állandó}$$

A SZIGETELÉSEK JOBB KIHASZNÁLTSÁGÁT ELŐSEGÍTŐ MÓDSZEREK

- 1) Kedvező alaptípus választása
- 2) Jól számítható elrendezés
- 3) Hengeres erőterben: - optimális sugárárány választása
- rétegzés
- 4) Homogén erőterben: NE legyen rétegzés

A SZIGETELÉSEK JOBB KIHASZNÁLÁSÁT ELŐSEGÍTŐ MÓDSZEREK



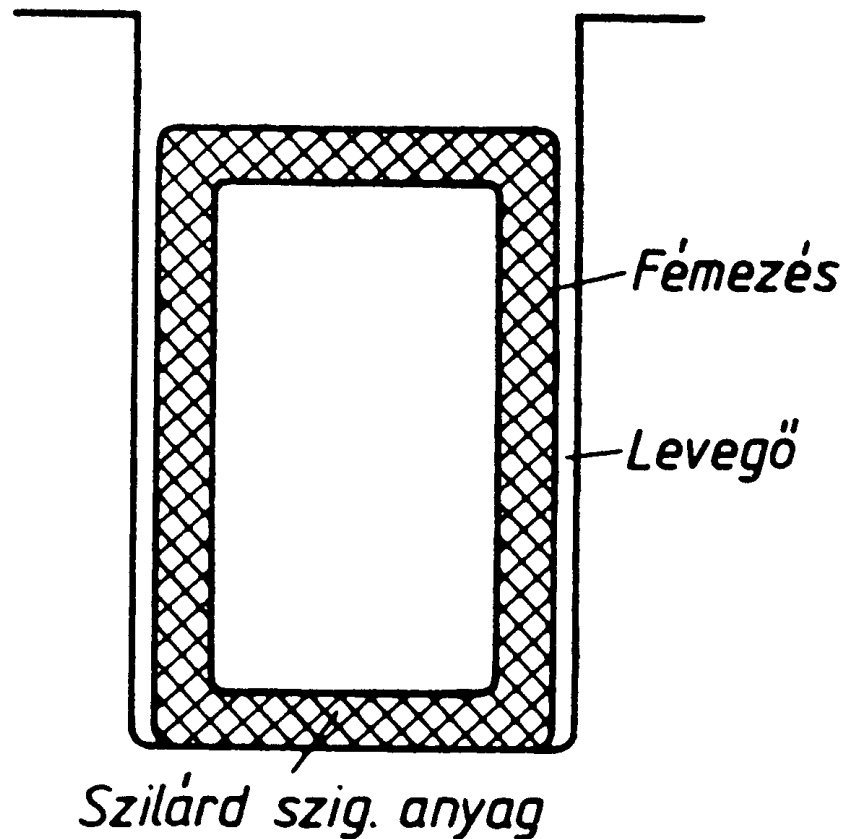
Példa: $a_{sz} = 4 \text{ mm}$ $\epsilon_{sz} = 5$
 $a_{lev} = 0,2 \text{ mm}$ $\epsilon_{sz} = 1$
 $U_n = 10,5 \text{ kV}$

$$U = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = 6 \text{ kV}$$

$$E_{lev} = U \frac{\epsilon_{sz}}{a_{sz} \epsilon_{lev} + a_{lev} \epsilon_{sz}} = 60 \text{ kV/cm} > E_{\ddot{u}t \text{ lev}} = 52,5 \text{ kV/cm}$$

A SZIGETELÉSEK JOBB KIHASZNÁLÁSÁT ELŐSEGÍTŐ MÓDSZEREK

Megoldás:



$$E_{sz} = \frac{U}{a_{sz}} = \frac{6 \text{ kV}}{4 \text{ mm}} = 15 \text{ kV/cm}$$

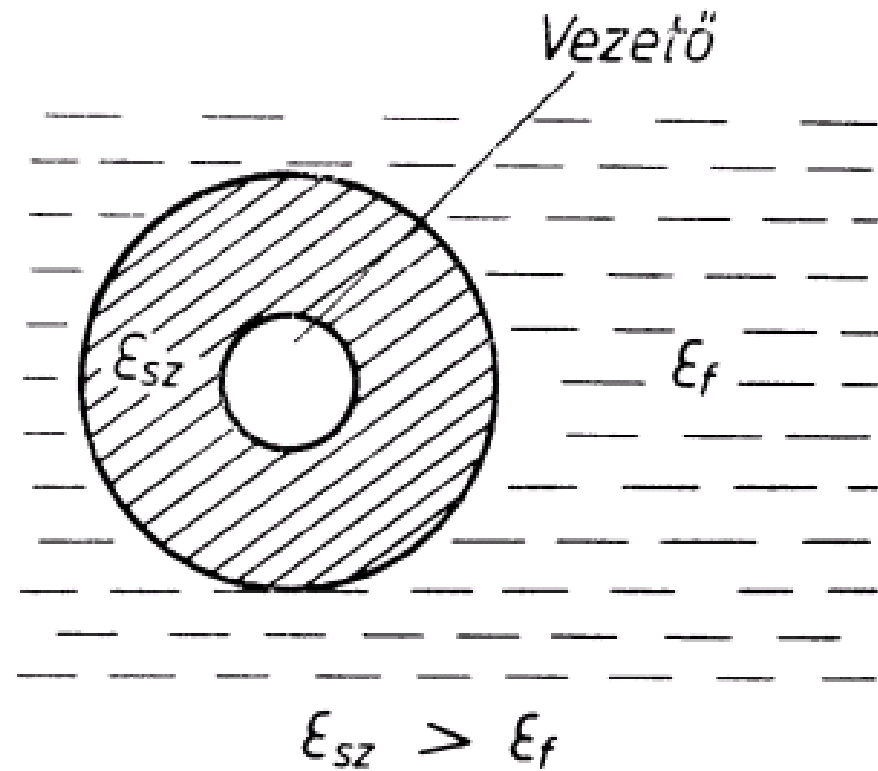
$$E_{\text{üt sz}} = 240 \text{ kV/cm}$$

$$E_{\text{üt sz}} \gg E_{sz}$$

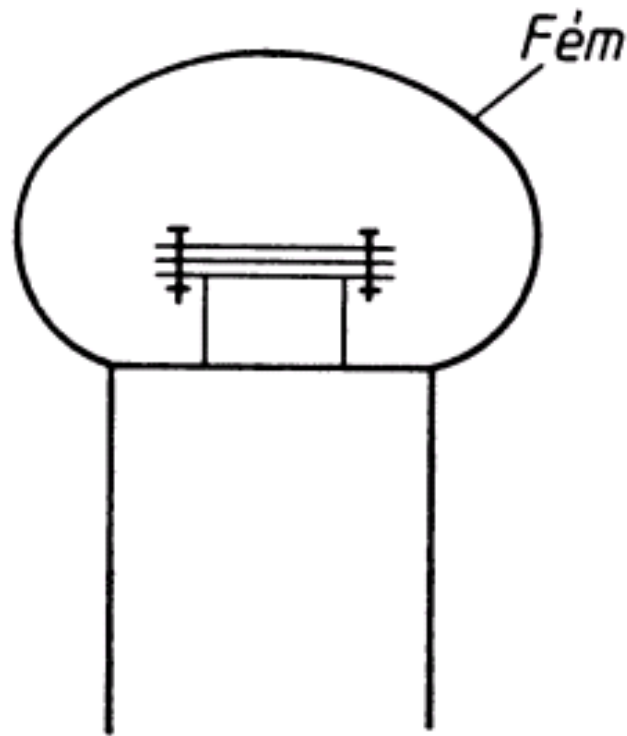
A SZIGETELÉSEK JOBB KIHASZNÁLTSÁGÁT ELŐSEGÍTŐ MÓDSZEREK

- 1) Kedvező alaptípus választása
- 2) Jól számítható elrendezés
- 3) Hengeres erőterben: - optimális sugárarány választása
- rétegzés
- 4) Homogén erőterben: NE legyen rétegzés
- 5) Gáz v. folyékony szigetelésben: burkolat
a burkolat lehet:
 - szigetelő: $\epsilon_{\text{burkolat}} > \epsilon_{\text{környezet}}$
 - fém: cél a görbületi sugár növelése

NAGY GÖRBDÉLETŰ ELEKTRÓDOK BURKOLÁSA SZIGETELŐANYAGGAL



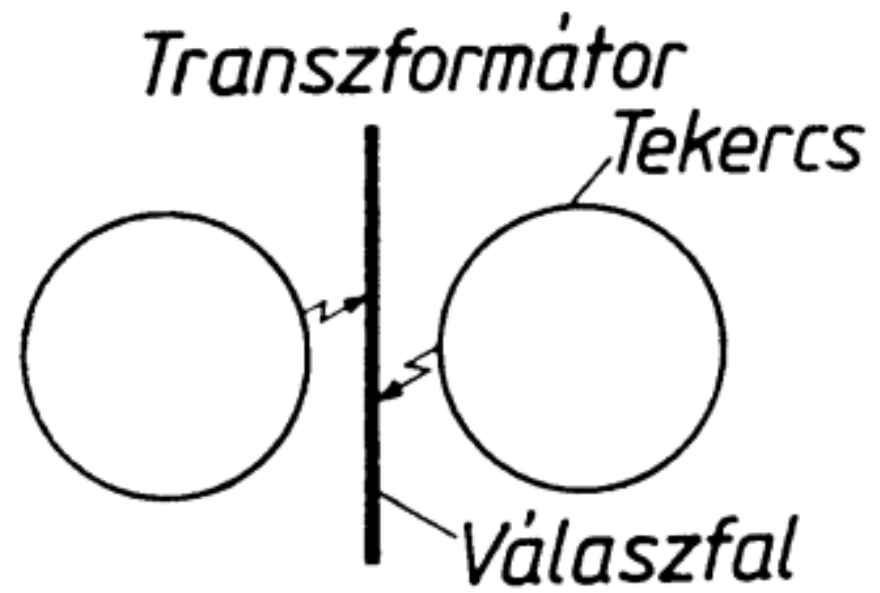
NAGY GÖRBÜLETŰ ELEKTRÓDOK BURKOLÁSA FÉMMEL (ÁRNYÉKOLÁS)



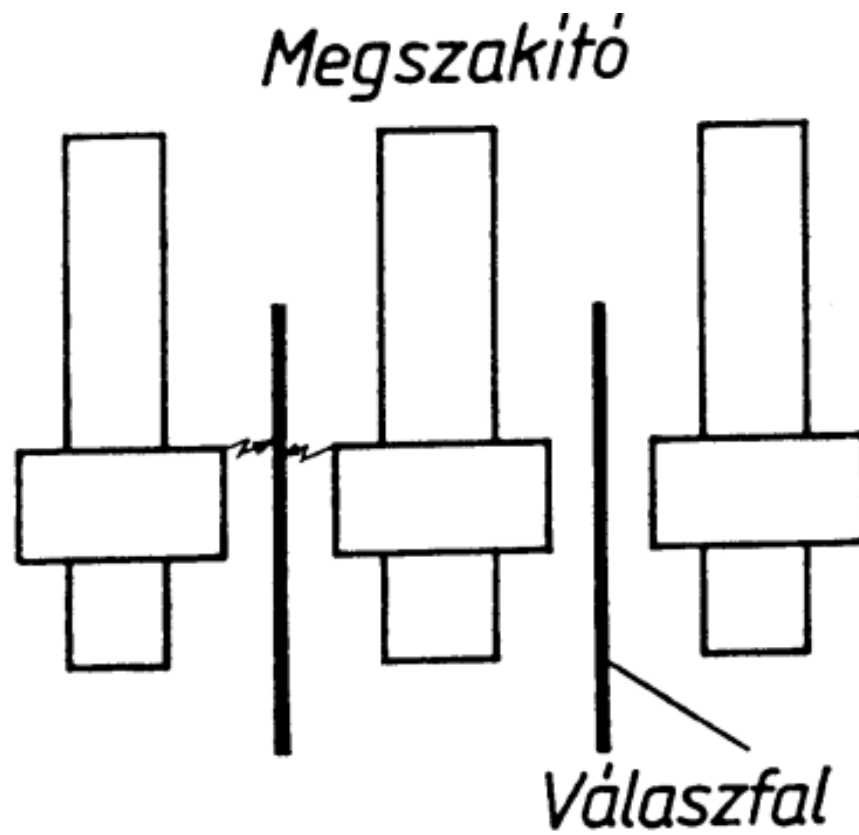
A SZIGETELÉSEK JOBB KIHASZNÁLTSÁGÁT ELŐSEGÍTŐ MÓDSZEREK

- 1) Kedvező alaptípus választása
- 2) Jól számítható elrendezés
- 3) Hengeres erőterben: - optimális sugárarány választása
- rétegzés
- 4) Homogén erőterben: NE legyen rétegzés
- 5) Gáz v. folyékony szigetelésben: burkolat
- 6) Rövid idejű túlfeszültségek elleni védelem:
 - válaszfal (mindig szigetelő)
 - ernyő (fém vagy szigetelő)

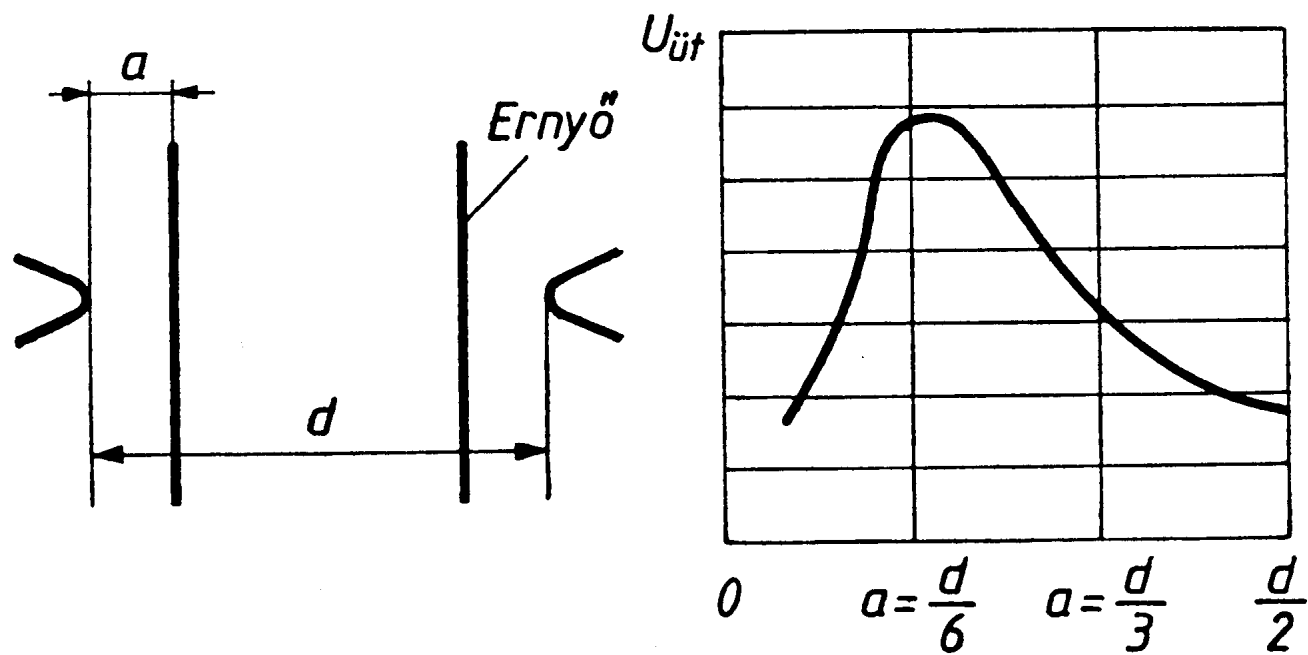
VÁLASZFAL



VÁLASZFAL



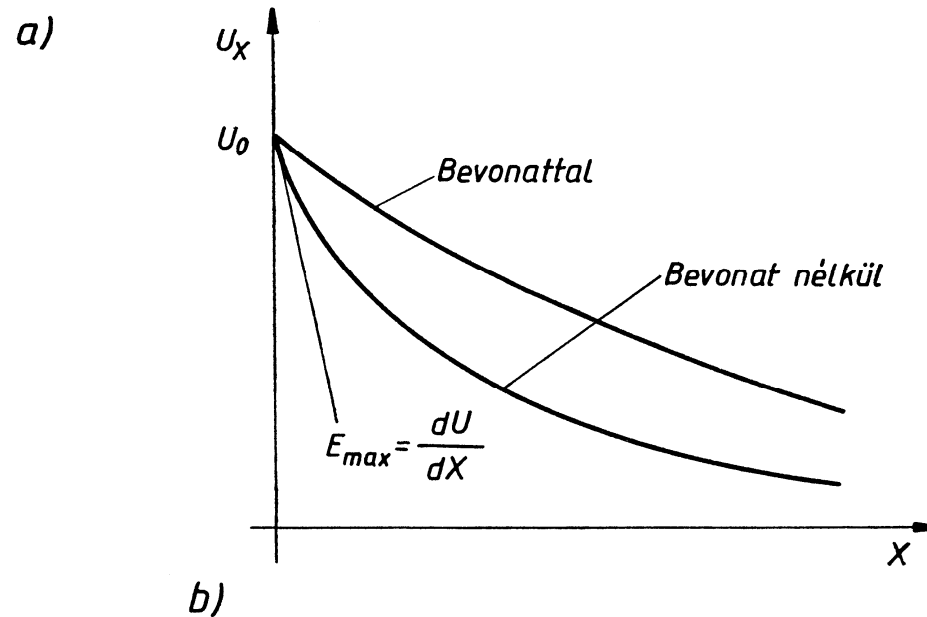
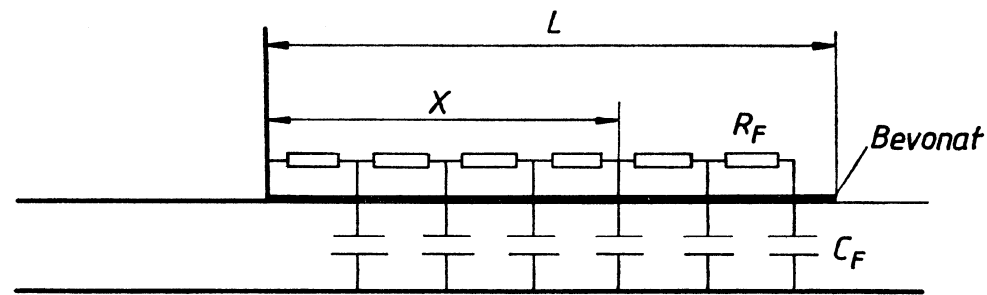
ERNYŐ



A SZIGETELÉSEK JOBB KIHASZNÁLTSÁGÁT ELŐSEGÍTŐ MÓDSZEREK

- 1) Kedvező alaptípus választása
- 2) Jól számítható elrendezés
- 3) Hengeres erőterben: -optimális sugárarány választása
- rétegzés
- 4) Homogén erőterben: NE legyen rétegzés
- 5) Gáz v. folyékony szigetelésben: burkolat
- 6) Rövid idejű túlfeszültségek elleni védelem
- 7) Részben beágyazott alaptípus esetén
 - a) Átalakítása beágyazottá
 - b) Felület bevonása csökkentett ellenállású réteggel

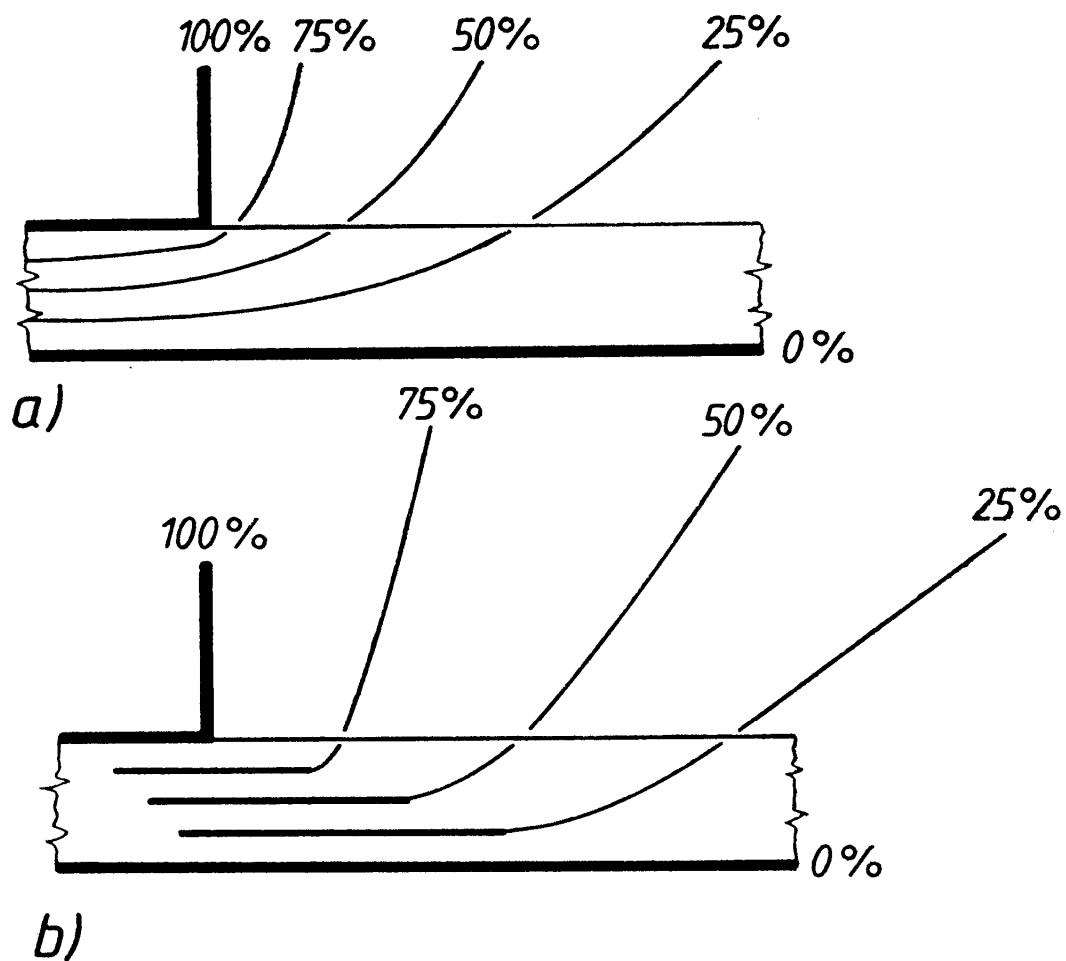
A FELÜLETI TÉRERŐSSÉG CSÖKKENTÉSE NAGYELLENÁLLÁSÚ VEZETŐRÉTEGGEL



A SZIGETELÉSEK JOBB KIHASZNÁLTSÁGÁT ELŐSEGÍTŐ MÓDSZEREK

- 1) Kedvező alaptípus választása
- 2) Jól számítható elrendezés
- 3) Hengeres erőterben: - optimális sugárarány választása
- rétegzés
- 4) Homogén erőterben: NE legyen rétegzés
- 5) Gáz v. folyékony szigetelésben: burkolat
- 6) Rövid idejű túlfeszültségek elleni védelem
- 7) Részben beágyazott alaptípus esetén
 - a) Átalakítása beágyazottá
 - b) Felület bevonása csökkentett ellenállású réteggel
 - c) Potenciálvezérlő elektródok beépítése

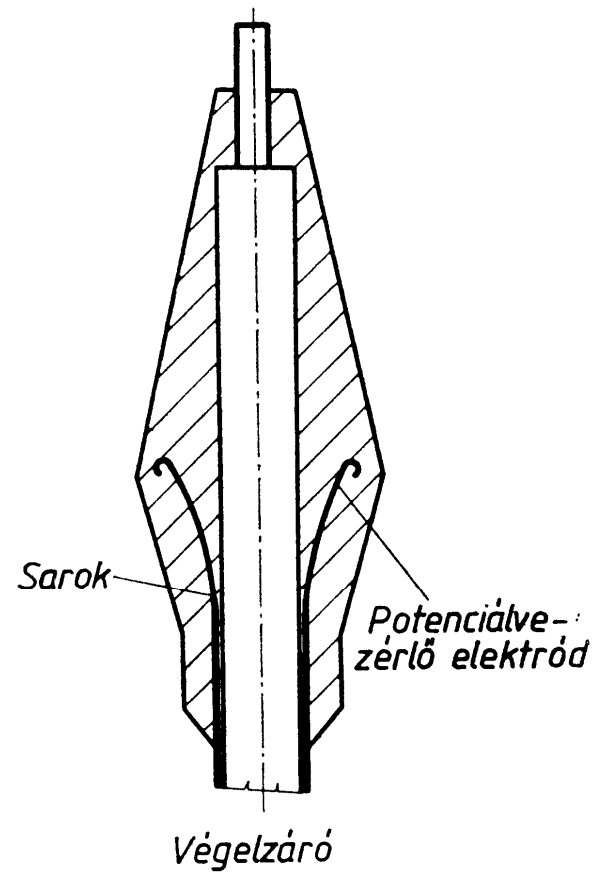
FELÜLETI TÉRERŐSSÉG CSÖKKENTÉSE FÓLIAELEKTRÓDOK BEÉPÍTÉSÉVEL



A SZIGETELÉSEK JOBB KIHASZNÁLTSÁGÁT ELŐSEGÍTŐ MÓDSZEREK

- 1) Kedvező alaptípus választása
- 2) Jól számítható elrendezés
- 3) Hengeres erőterben: -optimális sugárarány választása
- rétegzés
- 4) Homogén erőterben: NE legyen rétegzés
- 5) Gáz v. folyékony szigetelésben: burkolat
- 6) Rövid idejű túlfeszültségek elleni védelem
- 7) Részben beágyazott alaptípus esetén
 - a) Átalakítása beágyazottá
 - b) Felület bevonása csökkentett ellenállású réteggel
 - c) Belső potenciálvezérlő elektródok beépítése
 - d) Külső potenciálvezérlő elektródok beépítése (végelzáró)

FELÜLETI TÉRERŐSSÉG CSÖKKENTÉSE KÚPOS POTENCIÁLVEZÉRLŐ ELEKTRÓDOKKAL



**KÖSZÖNÖM
A
FIGYELMET!**

VIVEMA13

Váltakozó áramú rendszerek 2

(3+0+0 f 4k)

2016

készítette

Dr BERTA István egyetemi tanár és

Dr SZEDENIK Norbert egyetemi docens

Dr HORVÁTH Tibor professzor emeritus és

Dr NÉMETH Endre egyetemi docens

könyvei és előadásai felhasználásával

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamos Energetika Tanszék

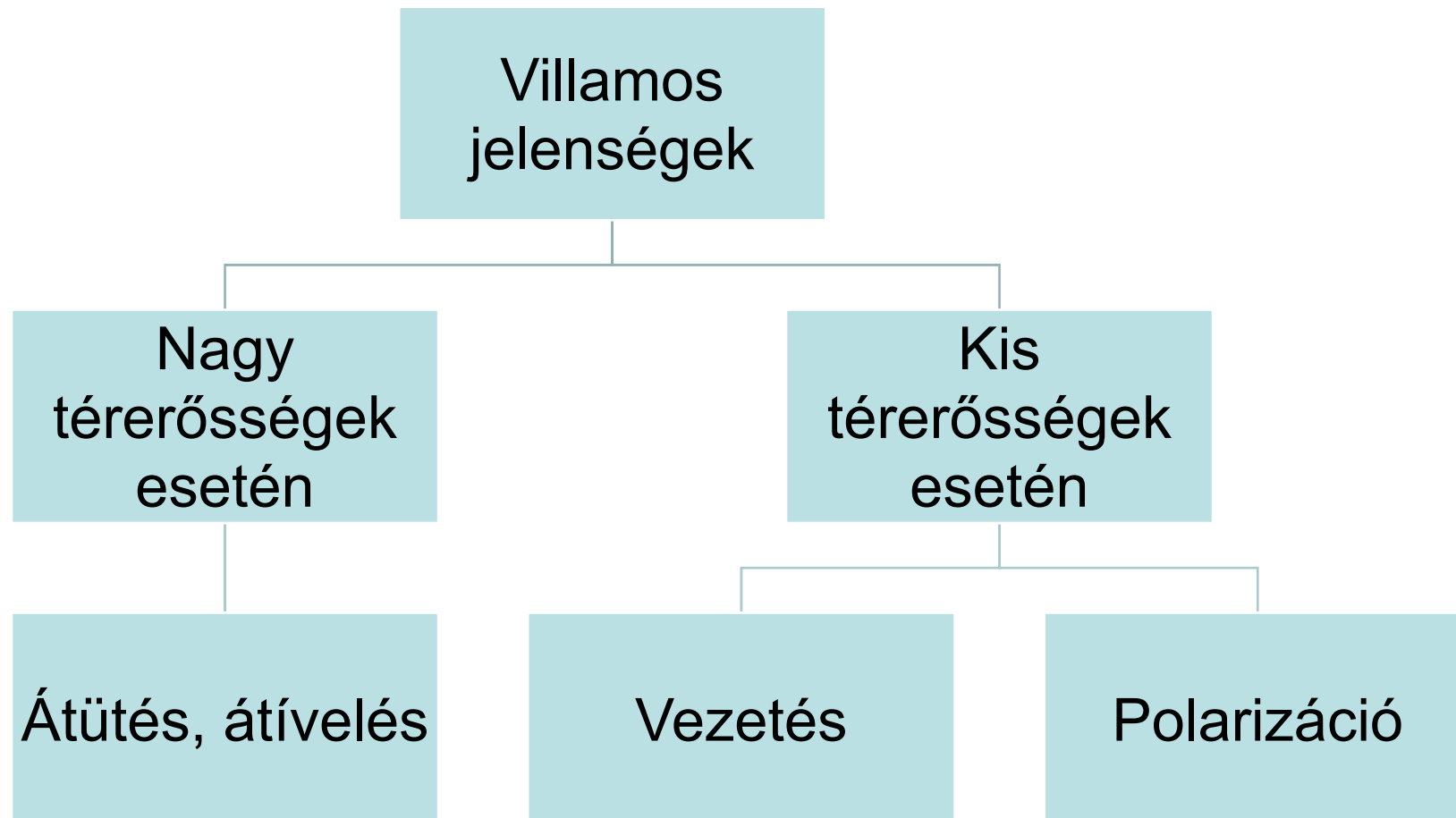
Nagyfeszültségű Technika és Berendezések Csoport

NF – 0 – 1 – 2 – 3

- 0 Az áramok háborúja (múlt – jelen – jövő)**
- 1 A villamos erőterek jellemzői. Energia és erőhatások villamos erőterekben. Feszültségeloszlás szigetelőkön. A váltakozó villamos terek analitikus és numerikus számítása.**
- 2 Villamos szigetelőanyagok változó erőterben. Vezetés és polarizáció, polarizáció spektrum. Szigetelésre kapcsolt váltakozó feszültség, vektorábrák, rétegezett szigetelések. A szigetelők villamos anyagjellemzői, azok frekvencia- és hőmérsékletfüggése. Villamos veszteségek (veszteségi tényező, dielektromos veszteségek).**
- 3 Váltakozó villamos erőterek előállítása és mérése. Kábelek és távvezetékek erőtere. Váltakozó feszültségű szigetelésvizsgálat. Feszültség-igénybevételek, próbafeszültségek.**

A szigetelésekben végbemenő fizikai folyamatok

Villamos jelenségek szigetelőanyagokban



Vezetés

SZIGETELŐANYAGOK VILLAMOS VEZETÉSE

$$\gamma = \frac{J}{E}$$

γ : fajlagos vezetőképesség, $1/\Omega\text{cm}$

ρ : fajlagos (térfogati) ellenállás, Ωcm

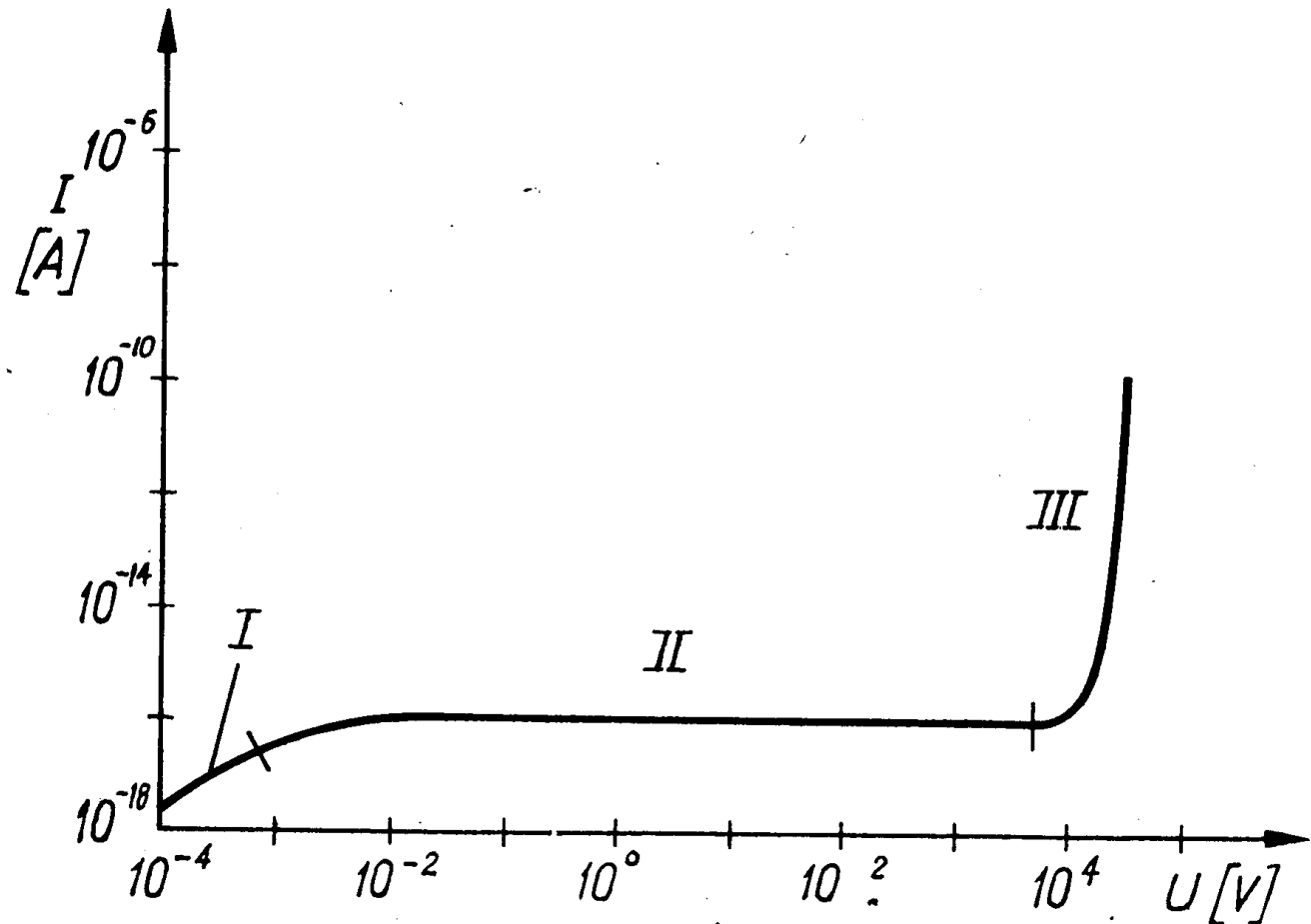
SZIGETELŐANYAGOK VILLAMOS VEZETÉSE

- Vezetés gázokban

I. arányos szakasz

II. telítési szakasz

III. elektron lavina



($A = 100 \text{ cm}^2$, $a = 1 \text{ cm}$, homogén erőter)

VEZETÉS GÁZOKBAN

Töltéshordozók: elektronok, ionok

Nagy a külső ionozó hatások szerepe

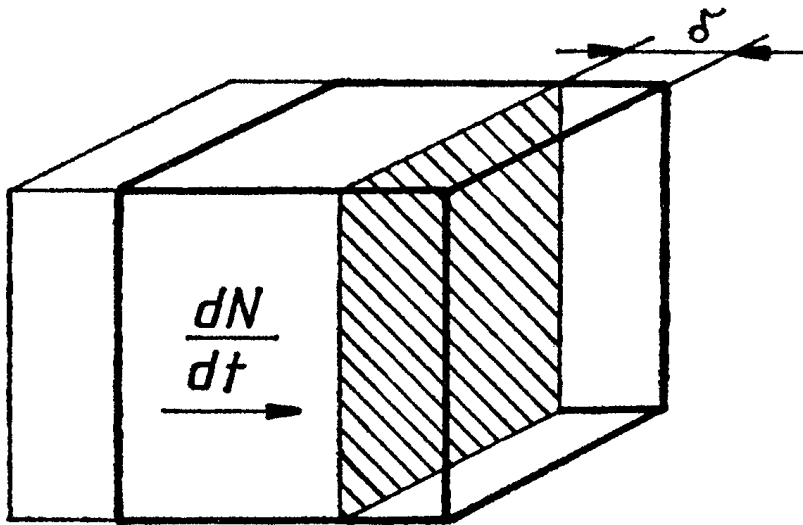
$$N = 10^3 \dots 10^4 \text{ ion/cm}^3$$

Normál levegőben:

$$E = 10 \text{ V/cm} \rightarrow j = 10^{-15} \dots 10^{-16} \text{ A/cm}^2$$

SZIGETELŐANYAGOK VILLAMOS VEZETÉSE

- Vezetés folyadékokban
 - Ionos vezetés



$$J = q_i \delta \frac{dN}{dt}$$

q_i : egy ion töltése

dN/dt : a térerősség irányába mozgó
ionok száma egységnyi idő alatt

VEZETÉS FOLYADÉKOKBAN

Töltéshordozók: ionok

Fajlagos vezetőképesség: $\gamma = Ae^{-B/T}$

ahol: A, B: anyagtól függő állandók

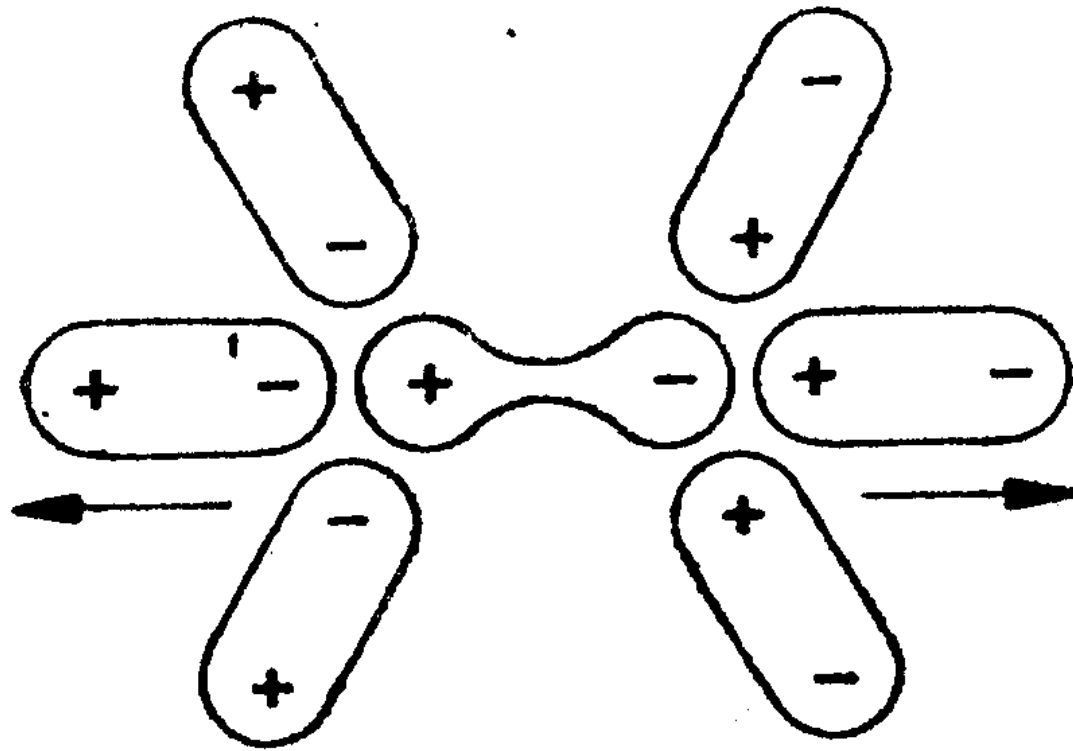
T: hőmérséklet, K

$$\gamma = \gamma_o e^{a(\vartheta - \vartheta_o)}$$

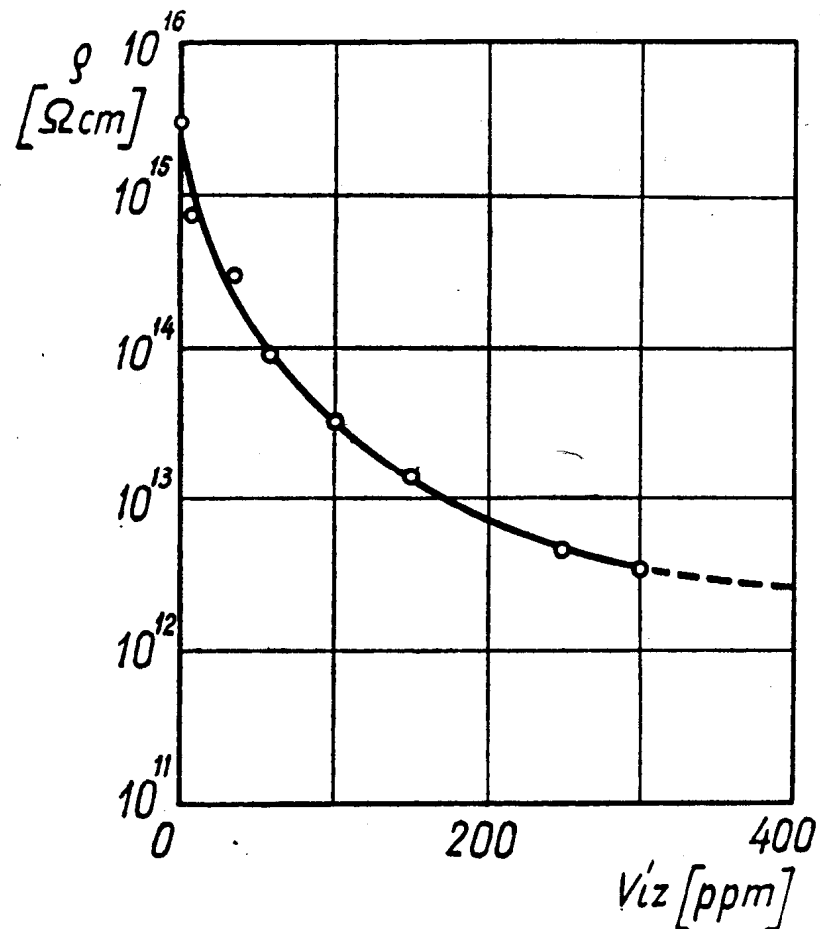
szigetelő folyadékok esetén: $\gamma < 10^{-6} \text{ 1}/\Omega\text{cm}$

SZIGETELŐANYAGOK VILLAMOS VEZETÉSE

- Vezetés folyadékokban
 - Disszociáció

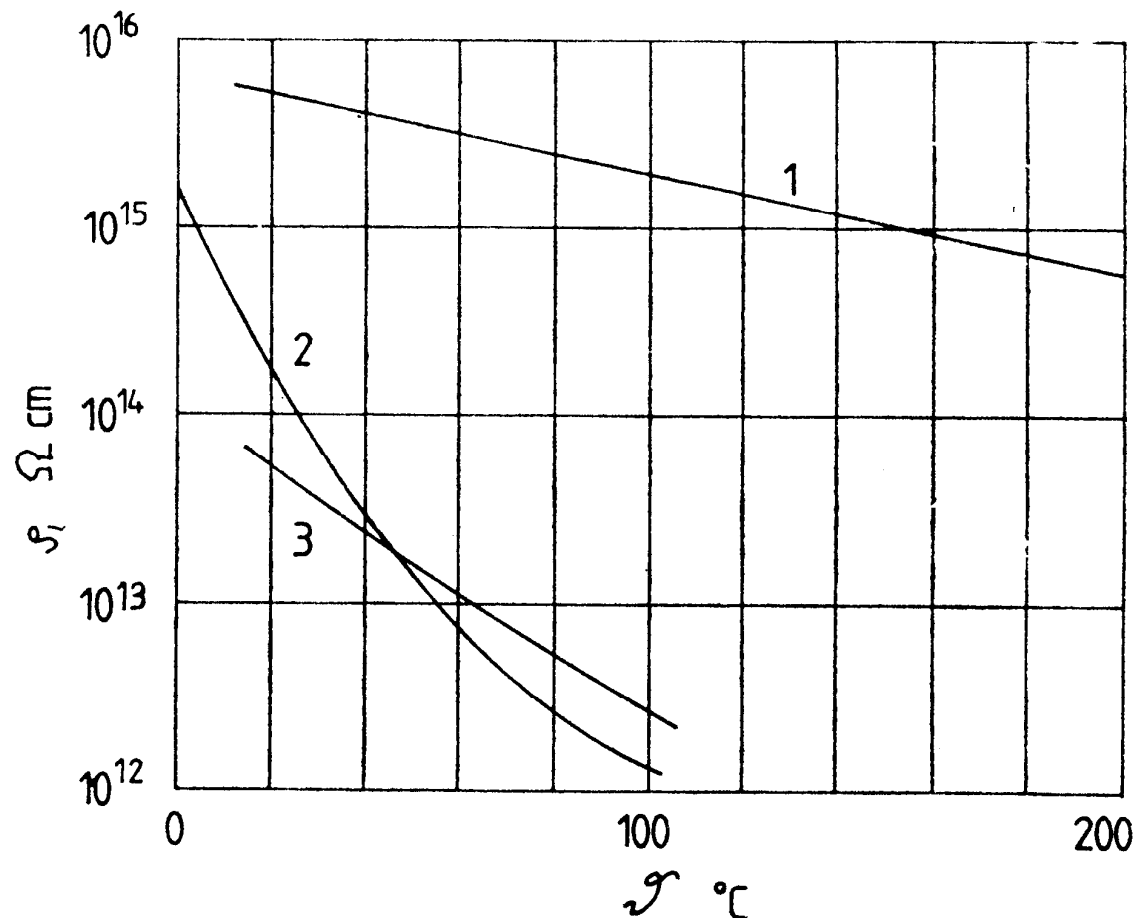


SZIGETELŐANYAGOK VILLAMOS VEZETÉSE



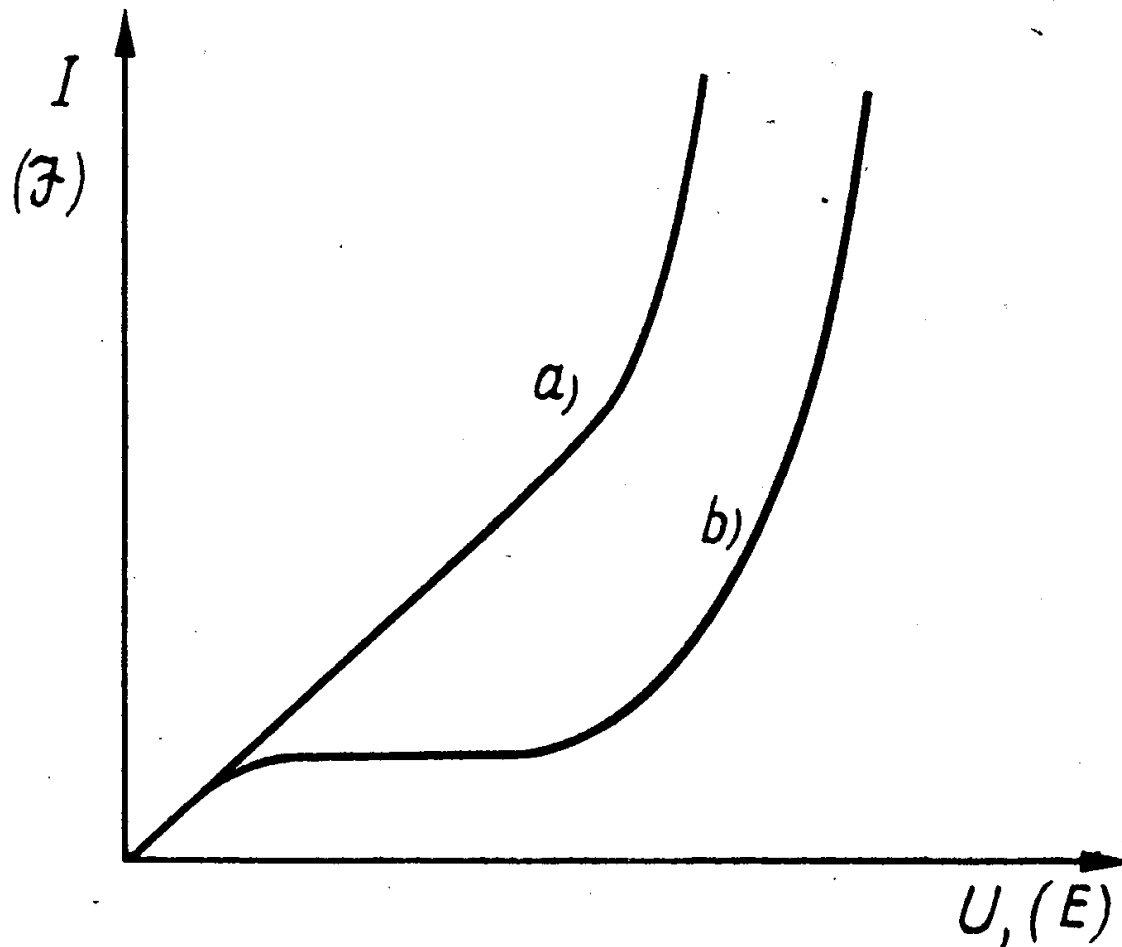
- Vezetés folyadékokban
– Szennyezés hatása

SZIGETELŐANYAGOK VILLAMOS VEZETÉSE



- A vezetés hőmérséklet-függése
 - 1 szilikonolaj
 - 2 pentaklór-difenil
 - 3 transzformátor olaj

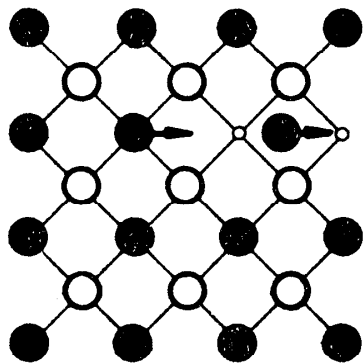
SZIGETELŐANYAGOK VILLAMOS VEZETÉSE



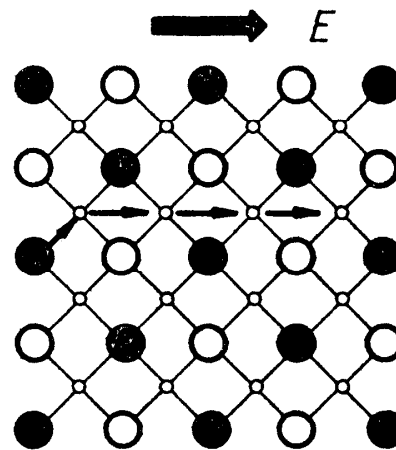
- A vezetés
térférfősség-
függése
 - a.) technikai
tisztaságú
 - b.) extrém
tisztaságú

SZILÁRD SZIGETELŐANYAGOK VILLAMOS VEZETÉSE

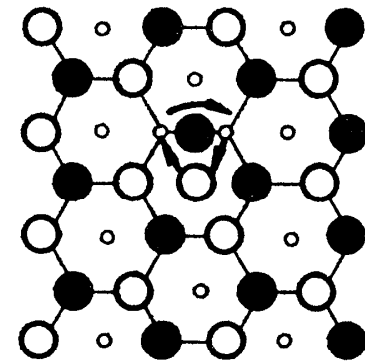
- Vezetés kristályos anyagokban
 - a.) lyukvezetés telített kristályban
 - b.) ionvezetés telítetlen kristályban
 - c.) ionvezetés metastabil helyek útján



a)



b)

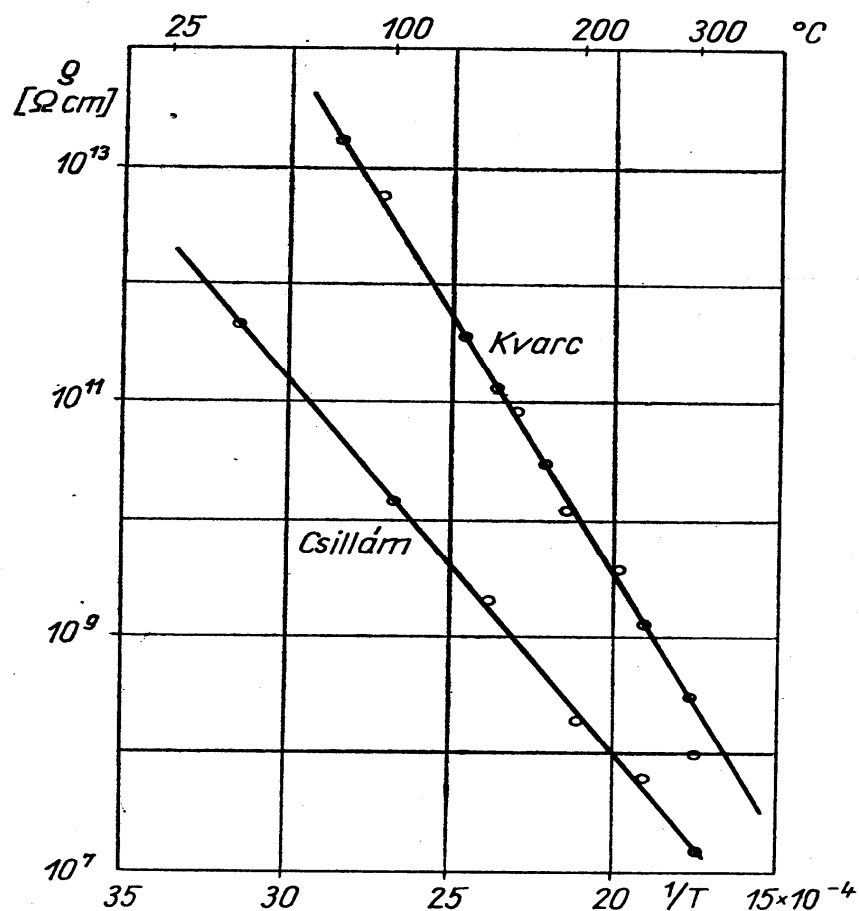


c)

SZILÁRD SZIGETELŐANYAGOK VILLAMOS VEZETÉSE

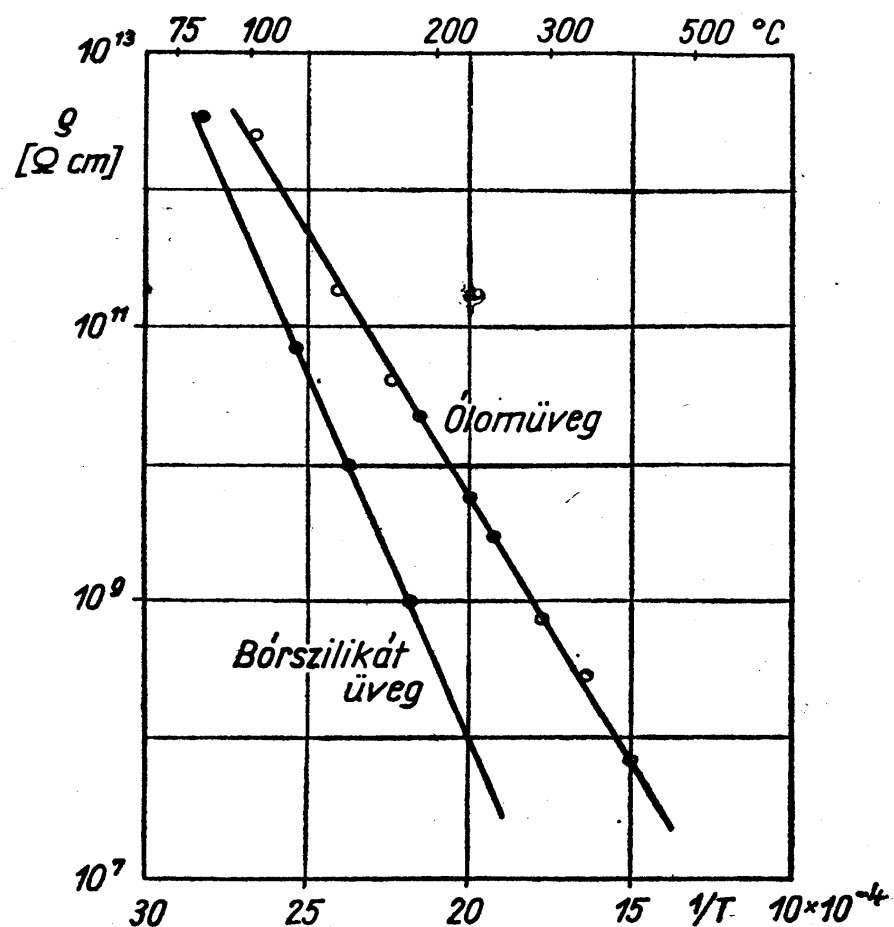
- Vezetés amorf anyagokban
 - Nincs általános összefüggés
 - Hasonló a folyadékokéhoz

SZILÁRD SZIGETELŐANYAGOK VILLAMOS VEZETÉSE



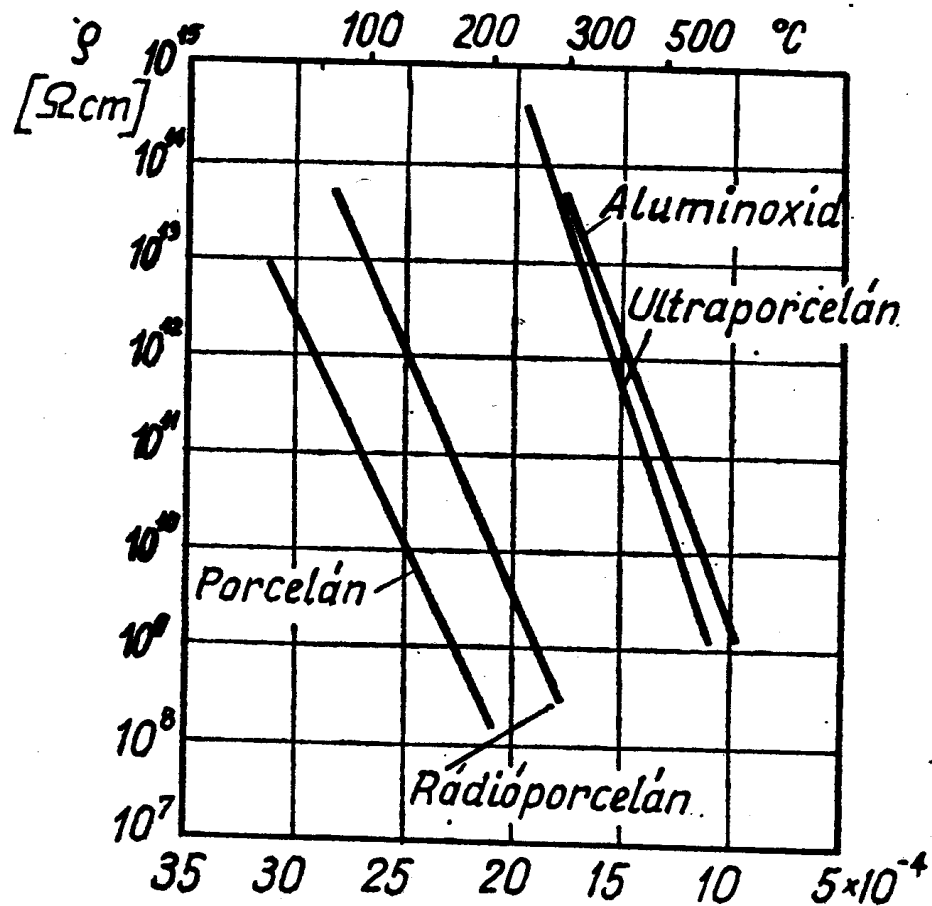
- A vezetés hőmérsékletfüggése
– Kristályos anyagok

SZILÁRD SZIGETELŐANYAGOK VILLAMOS VEZETÉSE



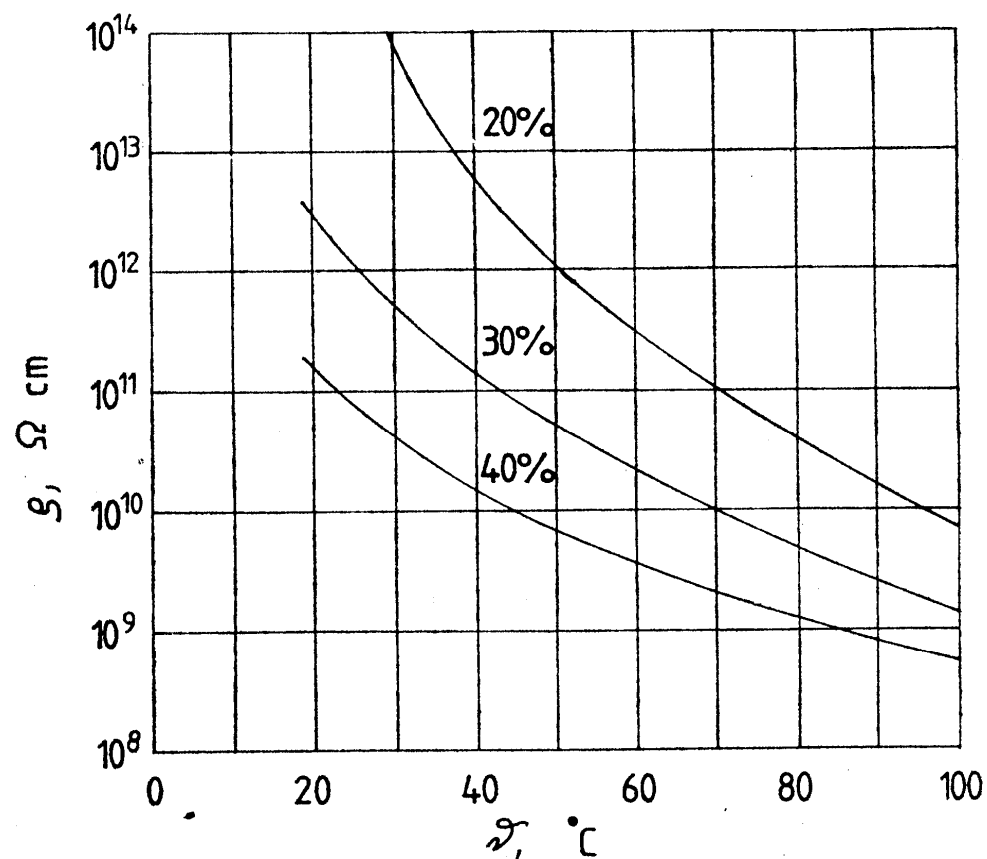
- A vezetés hőmérsékletfüggése
– Amorf anyagok

SZILÁRD SZIGETELŐANYAGOK VILLAMOS VEZETÉSE



- A vezetés hőmérsékletfüggése
– Keramikus anyagok

SZILÁRD SZIGETELŐANYAGOK VILLAMOS VEZETÉSE



- A vezetés hőmérsékletfüggése
 - PVC különböző mennyiségű lágyítóval

SZILÁRD SZIGETELŐANYAGOK VILLAMOS VEZETÉSE

Töltéshordozók: ionok

Fajlagos vezetőképesség: $\gamma = Ae^{-B/T}$

ahol: A, B: anyagtól függő állandók
T: hőmérséklet, K

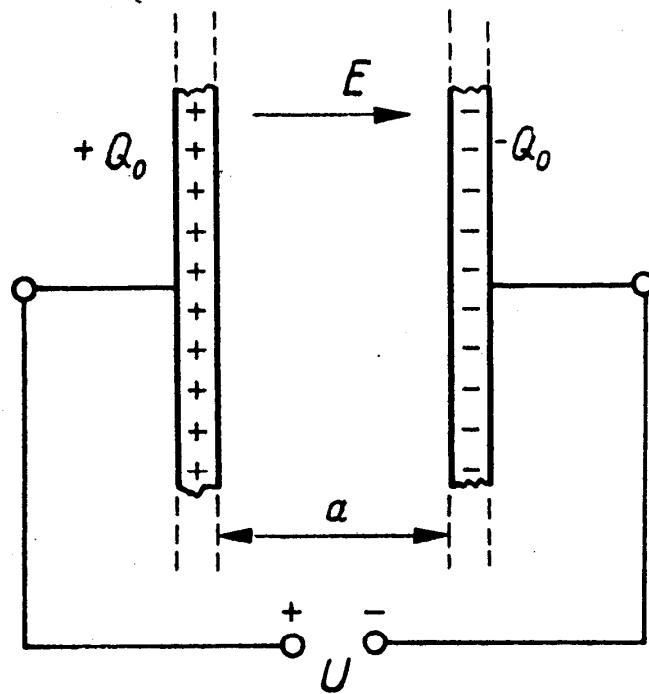
Fajlagos vezetőképesség: $\gamma = ae^{bE}$

ahol: a, b: anyagtól függő állandók
E: térerősség

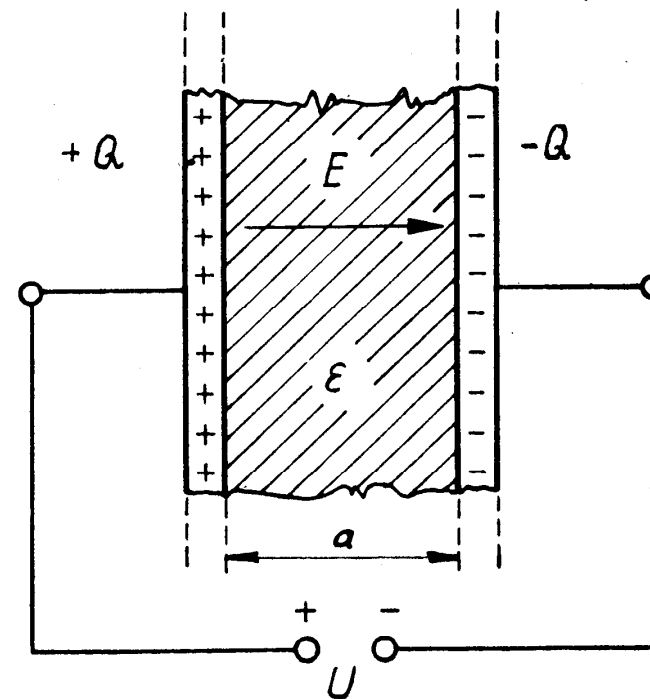
Polarizáció

POLARIZÁCIÓ

- A polarizáció makro-jellemzői

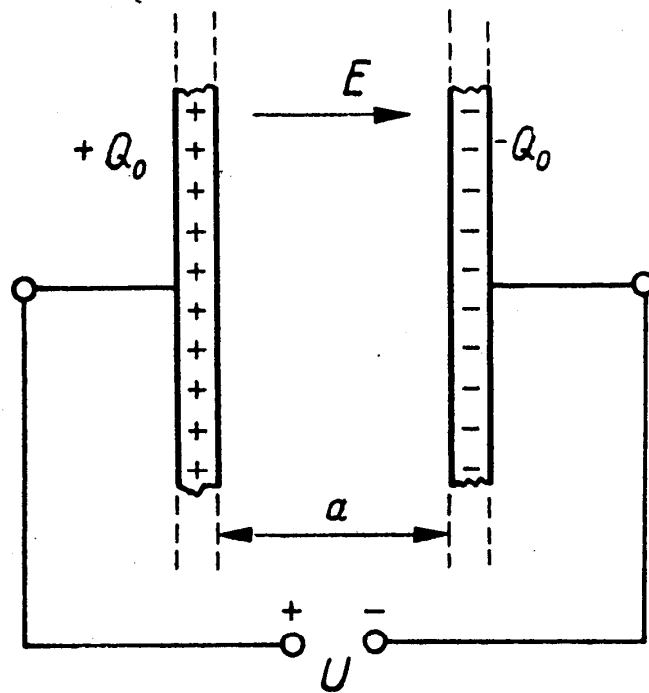


a)

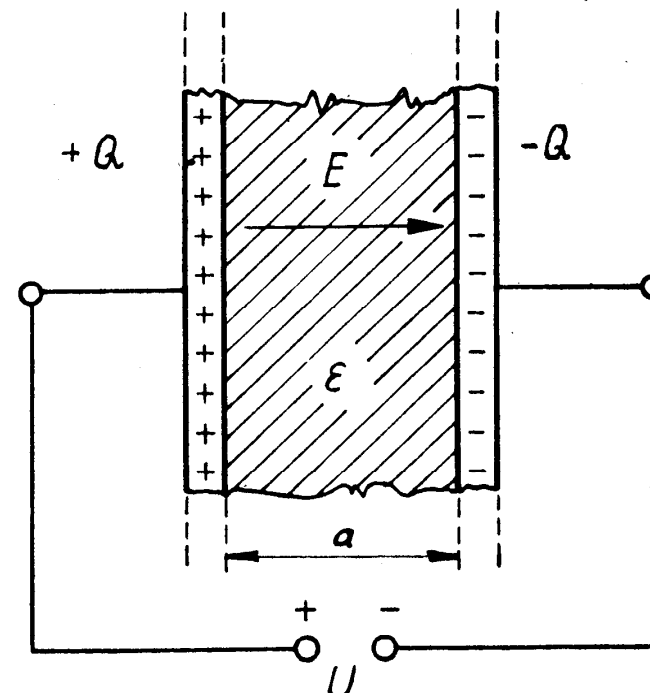


b)

POLARIZÁCIÓ



a)



b)

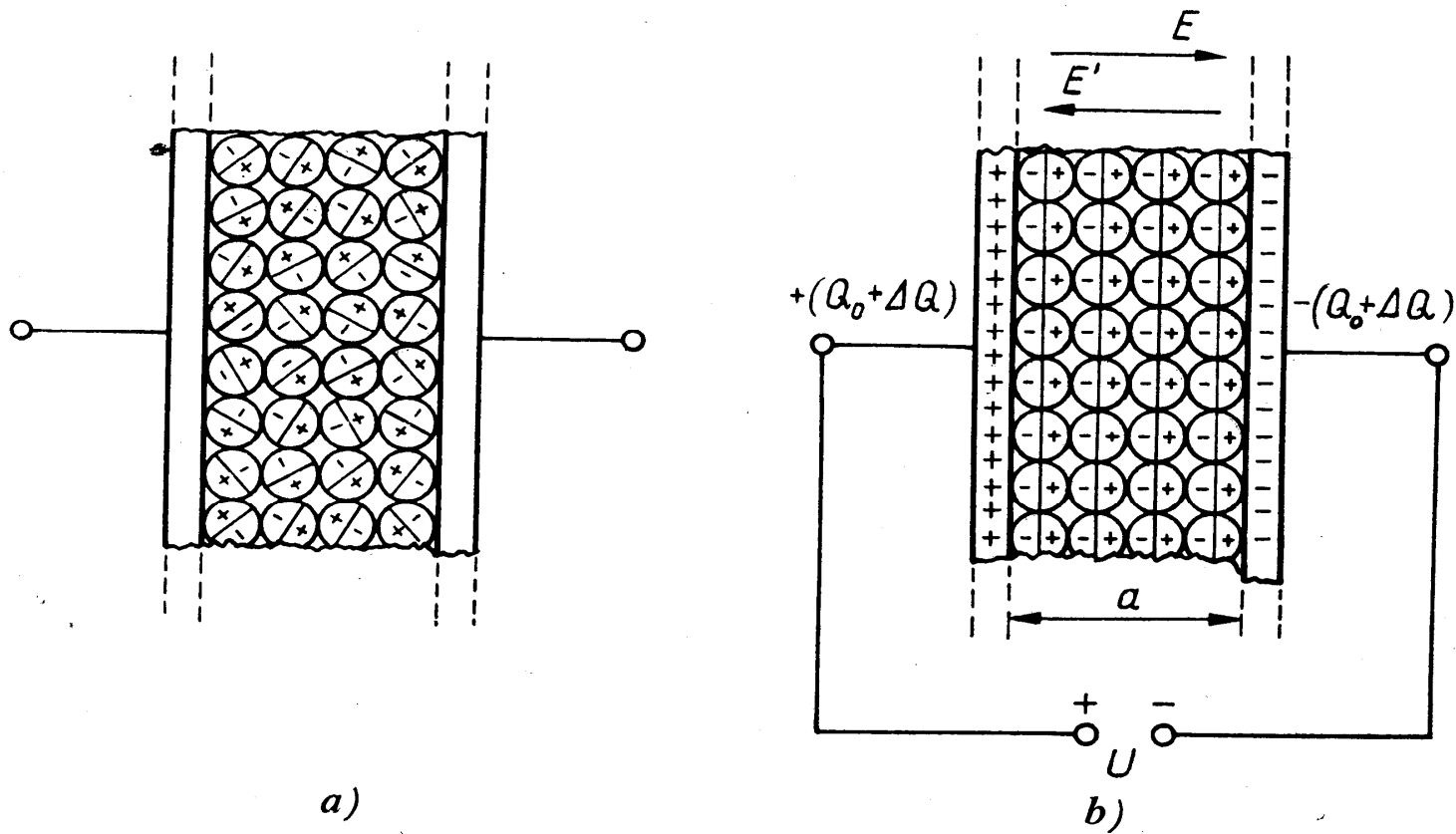
$$Q = Q_0 + \Delta Q = Q_{sz} + Q_k$$

Q_{sz} : szabad töltések

Q_k : kötött töltések

POLARIZÁCIÓ

- A polarizáció makro-jellemzői



POLARIZÁCIÓ

$$Q = Q_0 + \Delta Q = Q_{sz} + Q_k$$

$$Q = \varepsilon Q_{sz} \quad \rightarrow \quad \varepsilon = \frac{Q}{Q_{sz}}$$

$$Q = Q_{sz} + Q_k = \frac{Q}{\varepsilon} + Q_k \quad \rightarrow \quad Q_k = Q \left(1 - \frac{1}{\varepsilon} \right)$$

$$E = \frac{U}{a} = \frac{Q}{aC} = \frac{Q}{a\varepsilon\varepsilon_0 \frac{A}{a}} = \frac{Q_{sz}}{A\varepsilon_0} = \frac{\sigma_{sz}}{\varepsilon_0} \quad \rightarrow \quad \varepsilon_0 E = \sigma_{sz}$$

$$D = \frac{Q}{A} = \sigma \quad \Rightarrow \quad P = \frac{Q_k}{A} = \sigma_k$$

POLARIZÁCIÓ

$$Q = Q_0 + \Delta Q = Q_{sz} + Q_k$$

$$\sigma = \sigma_{sz} + \sigma_k$$

$$D = \varepsilon_0 E + P$$

mivel $D = \varepsilon \varepsilon_0 E$

$$\varepsilon_0 E + P = \varepsilon \varepsilon_0 E$$

$$P = (\varepsilon - 1) \varepsilon_0 E$$

POLARIZÁCIÓ

$$M = Q_k a = \sigma_k A a = P V$$

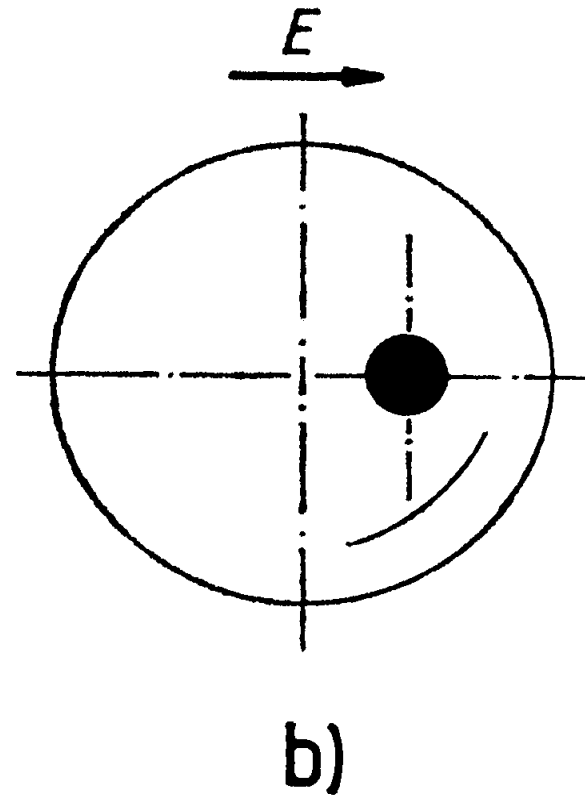
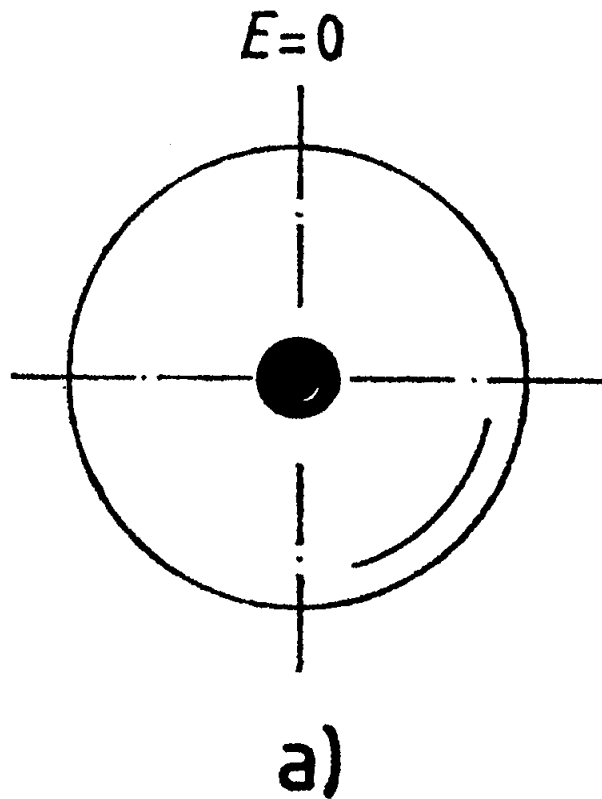
$$P = M / V$$

a térfogategységre jutó dipólusmomentum

POLARIZÁCIÓ

- A polarizáció fajtái

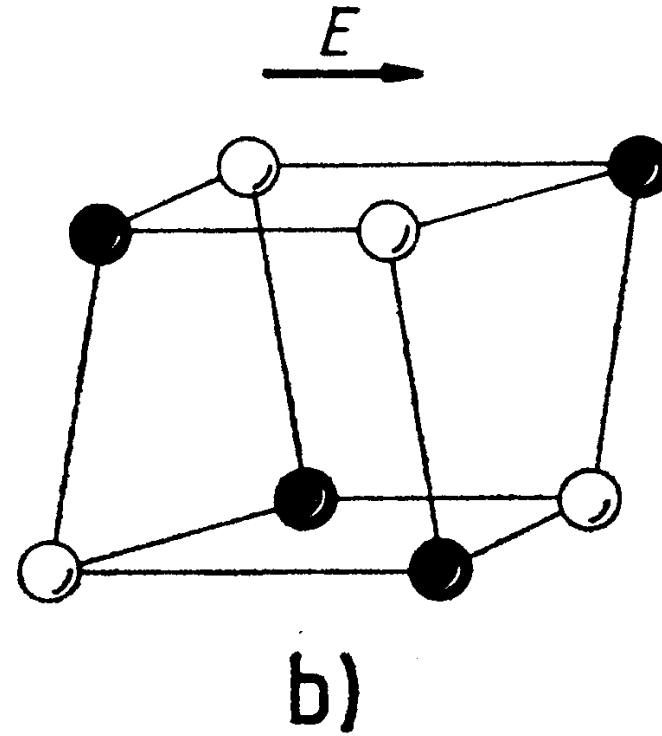
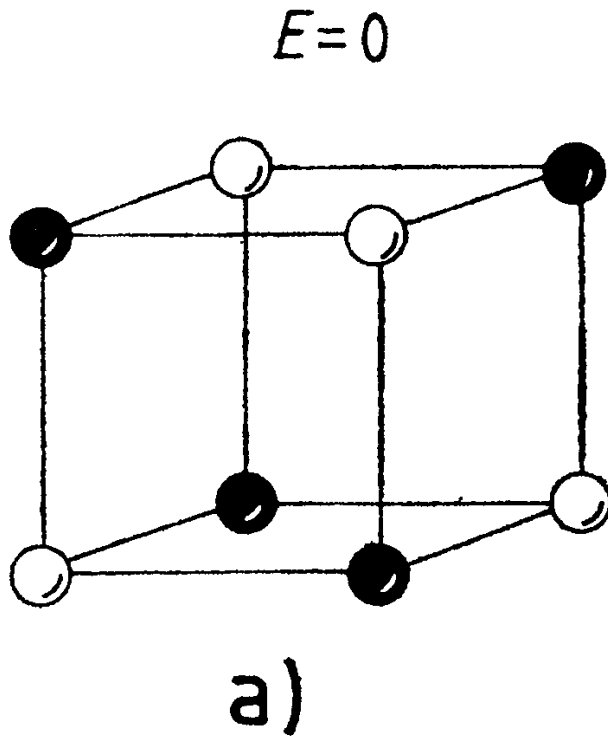
- Elektroneltolódási polarizáció $\tau = 10^{-14} - 10^{-16} \text{ s}$



POLARIZÁCIÓ

- A polarizáció fajtái
 - Ioneltolódási polarizáció

$$\tau = 10^{-12} - 10^{-13} \text{ s}$$

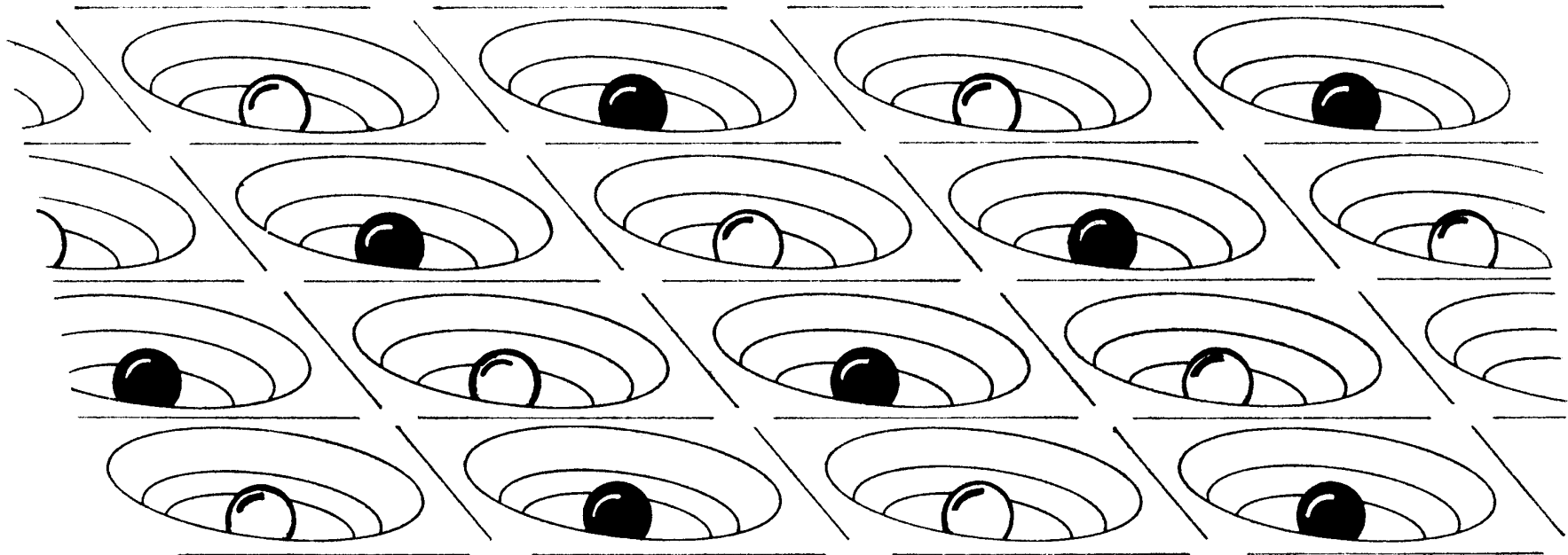


POLARIZÁCIÓ

- A polarizáció fajtái

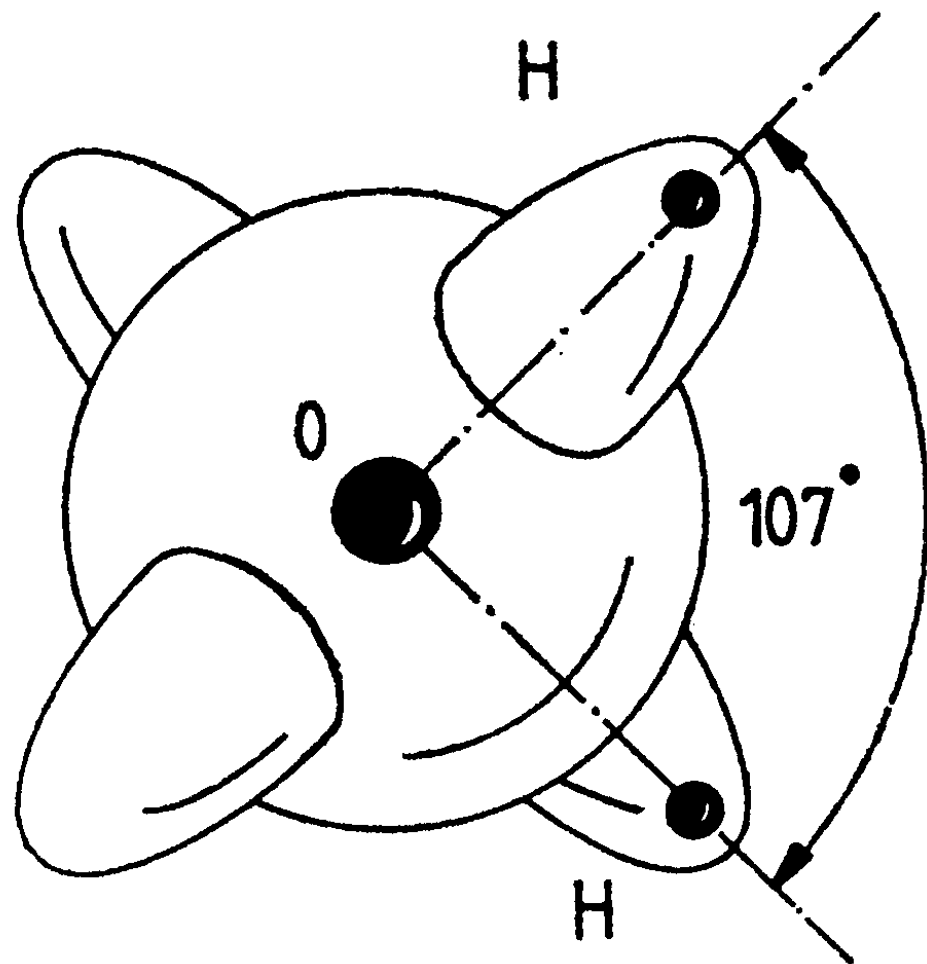
- Hőmérsékleti ionpolarizáció

$$\tau = 10^{-2} - 10^{-4} \text{ s}$$



Polarizáció

- A polarizáció fajtái
 - Állandó dipólusok

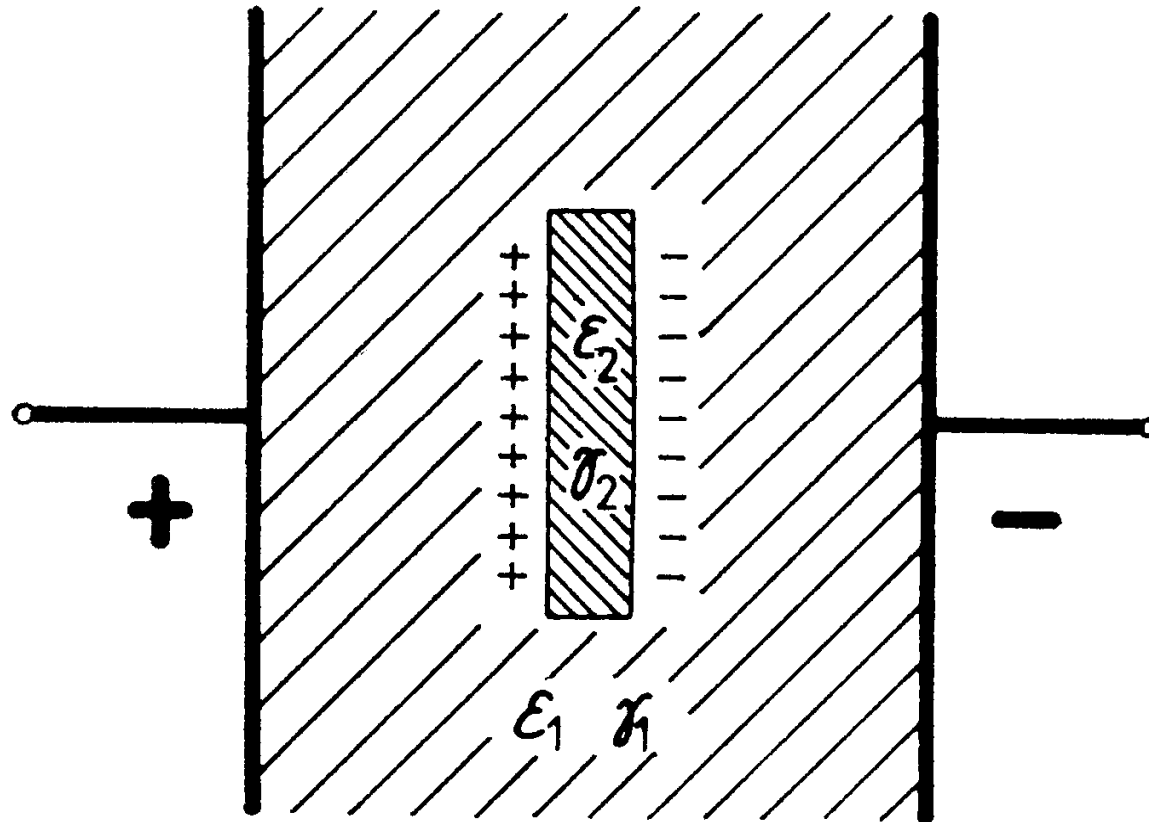


POLARIZÁCIÓ

- A polarizáció egyéb fajtái
 - Hőmérsékleti orientációs polarizáció $\tau = 10^{-6} - 10^{-10} \text{ s}$
 - Rugalmas orientációs polarizáció $\tau = 10^{-10} - 10^{-13} \text{ s}$

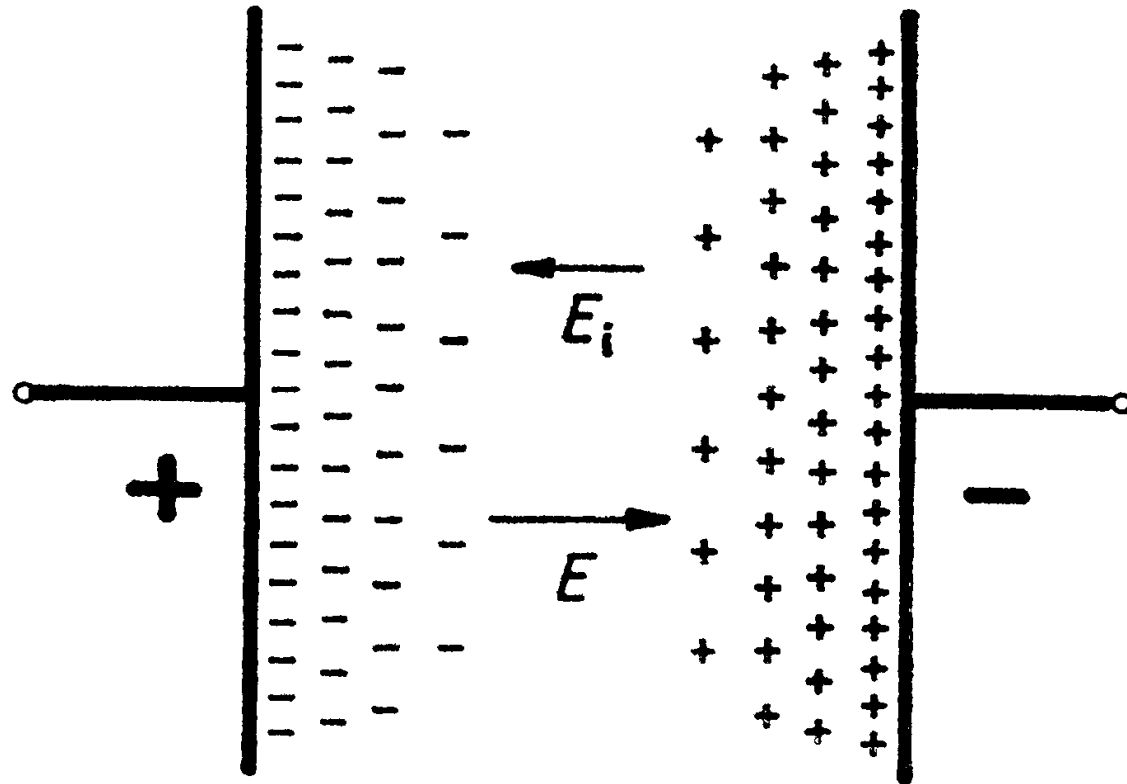
POLARIZÁCIÓ

- A polarizáció egyéb fajtái
 - Határréteg polarizáció

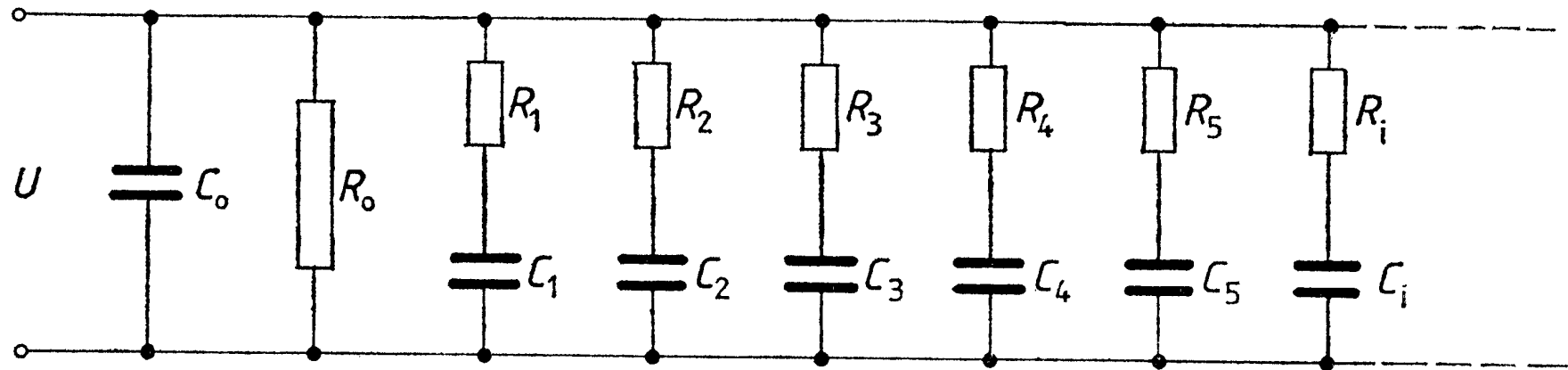


POLARIZÁCIÓ

- A polarizáció egyéb fajtái
 - Téröltéses polarizáció



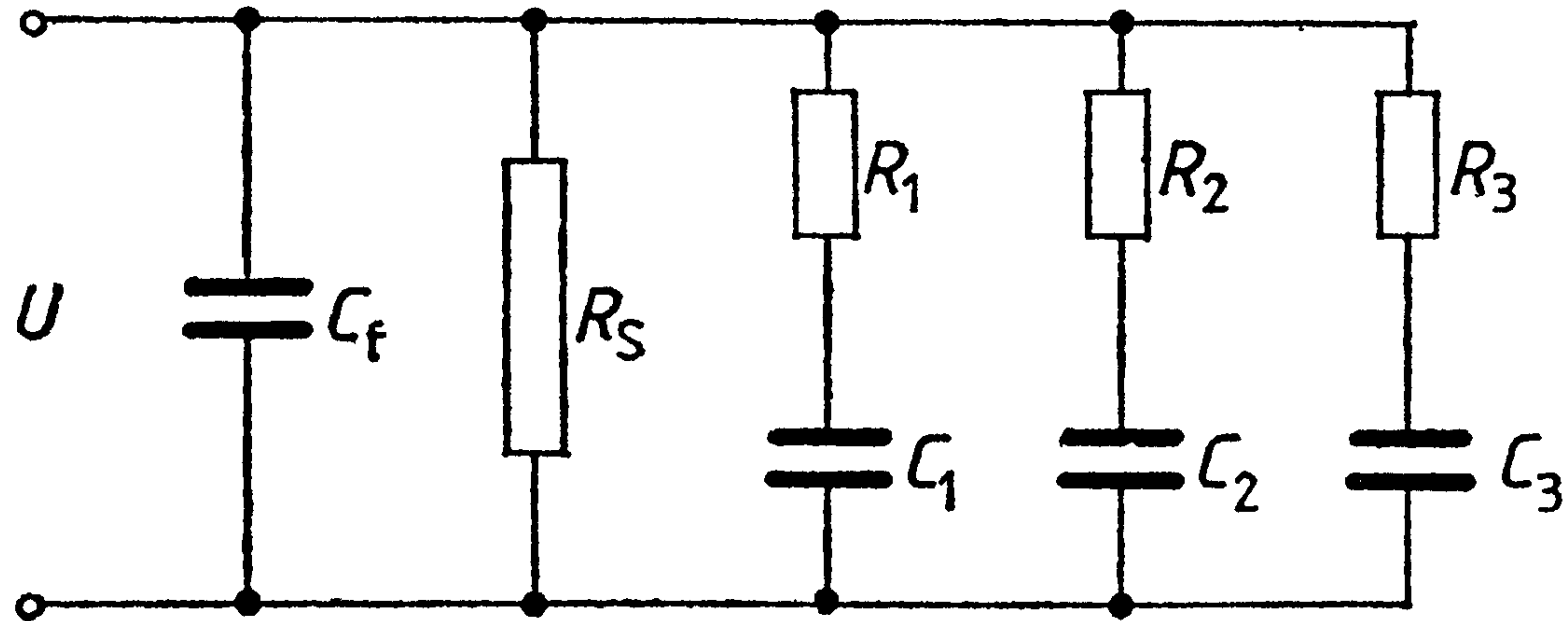
SZIGETELŐANYAGOK HELYETTESÍTŐ KAPCSOLÁSA



$$C_i/C_0 = \Delta\varepsilon_i / \varepsilon_0$$

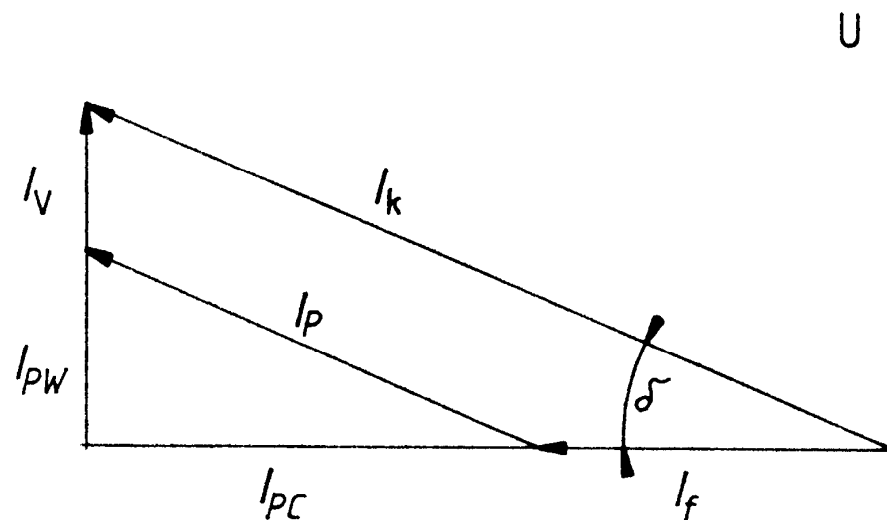
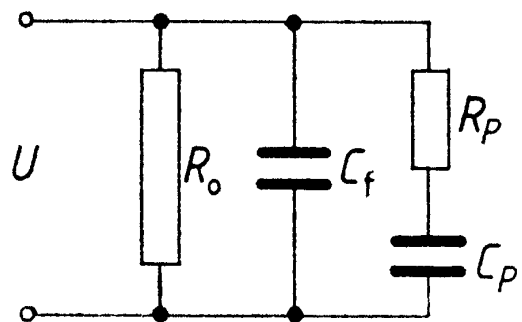
$$\tau_i = R_i C_i$$

SZIGETELŐANYAGOK HELYETTESÍTŐ KAPCSOLÁSA



VÁLTAKOZÓFESZÜLTTSÉGEN FELLÉPŐ JELENSÉGEK

Szigetelőanyag egyszerűsített fazorábrája



Veszteségi tényező:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_w}{I_c} = \frac{I_{pw} + I_v}{I_f + I_{pc}}$$

VÁLTAKOZÓFESZÜLTSÉGEN FELLÉPŐ JELENSÉGEK

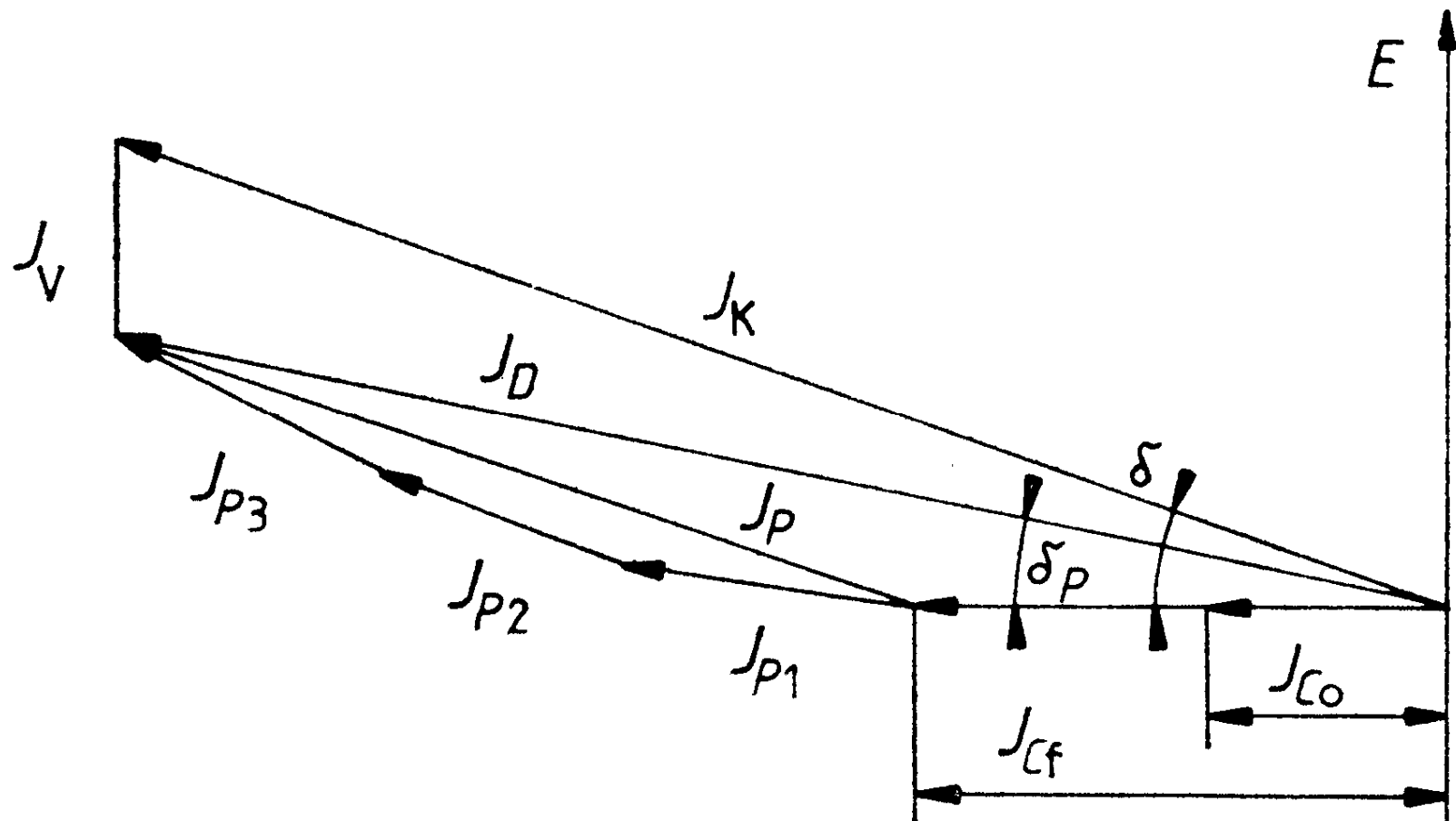
Veszteségi tényező

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_w}{I_c}$$

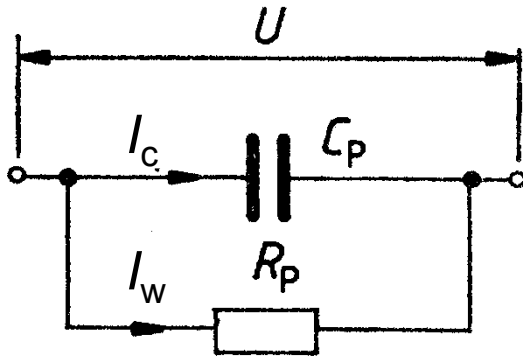
anyag	$10^4 \operatorname{tg} \delta$
csillám	2 - 5
PE	2 – 5
trafó olaj	20
porcelán	150
PVC	1000 - 1500

VÁLTAKOZÓFESZÜLTSÉGEN FELLÉPŐ JELENSÉGEK

Áramsűrűségek fazorábrája



VÁLTAKOZÓFESZÜLTSÉGEN FELLÉPŐ JELENSÉGEK



$$S = UI$$

látszólagos teljesítmény

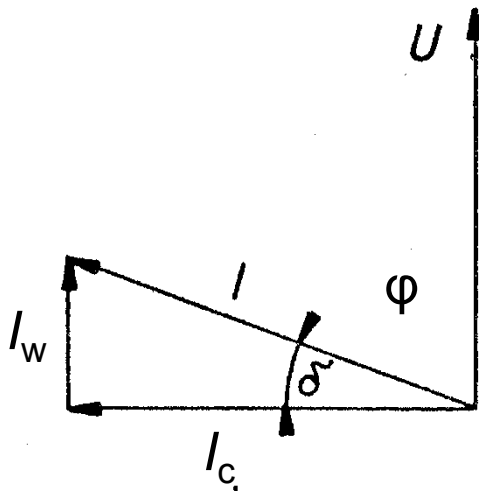
$$P = UI_w = UI \cos \varphi \text{ hatásos teljesítmény}$$

$$Q = UI_c = UI \sin \varphi \text{ meddő teljesítmény}$$

Csak I_c számítható könnyen: $I_c = \omega C U$

$$I_w = I_c \operatorname{tg} \delta = \omega C U \operatorname{tg} \delta$$

$$P = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta \text{ dielektromos veszteség}$$



VÁLTAKOZÓFESZÜLTSÉGEN FELLÉPŐ JELENSÉGEK

Szigetelőanyag vesztesége

dielektromos veszteség

$$P = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta$$

$$P = (2\pi f)(\varepsilon\varepsilon_0 \frac{A}{a})(a^2 E^2) \operatorname{tg} \delta$$

fajlagos veszteség

$$\rho = \frac{P}{V} = \omega\varepsilon\varepsilon_0 E^2 \operatorname{tg} \delta$$

térfogati veszteségi szám

$$\rho' = \frac{\rho}{E} = \omega\varepsilon\varepsilon_0 \operatorname{tg} \delta$$

A dielektromos veszteség

homogén erőterben:

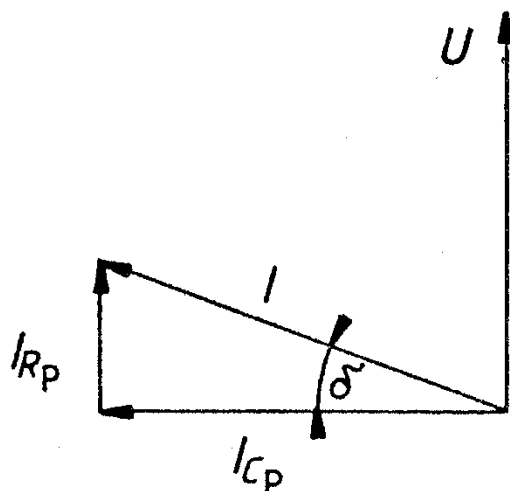
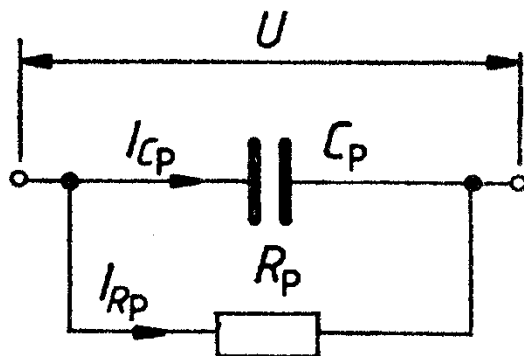
$$P = \rho V = \rho' E^2 V$$

inhomogén erőterben:

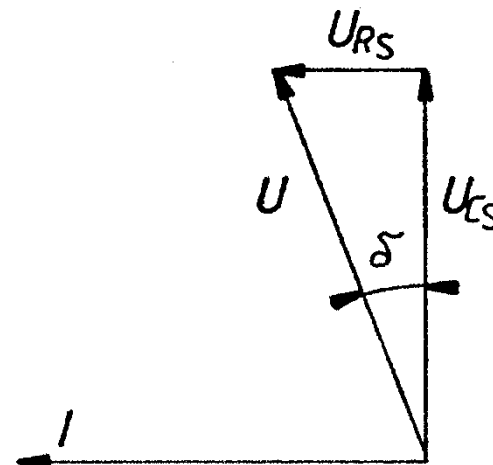
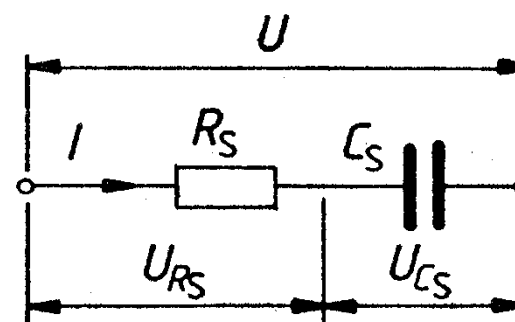
$$P = \int_V \rho \, dV = \int_V \rho' E^2 \, dV$$

VÁLTAKOZÓFESZÜLTSÉGEN FELLÉPŐ JELENSÉGEK

Reális szigetelés gyakorlati (egyszerűsített) helyettesítő
kapcsolásai



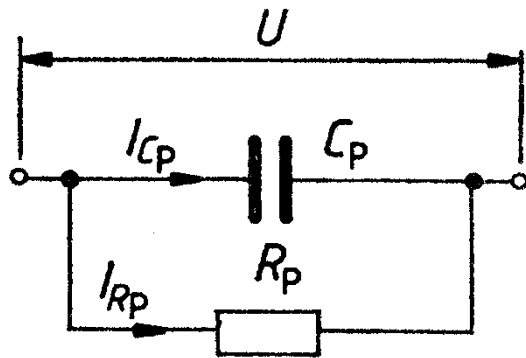
Párhuzamos helyettesítő kapcsolás



Soros helyettesítő kapcsolás

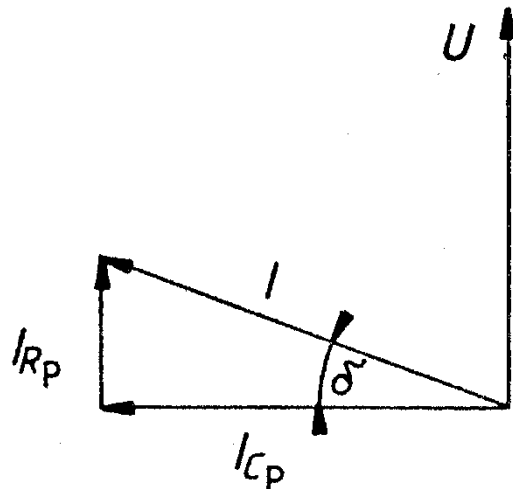
VÁLTAKOZÓFESZÜLTSÉGEN FELLÉPŐ JELENSÉGEK

Párhuzamos helyettesítő kapcsolás $I_v = \frac{U}{R_p}$ és $I_c = \omega C_p U$



$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_v}{I_c} = \frac{U/R_p}{\omega C_p U} = \frac{1}{\omega R_p C_p}$$

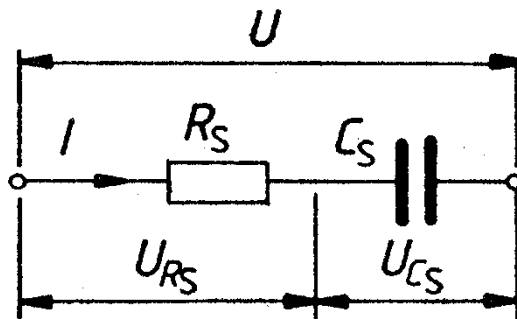
$$P = \frac{U^2}{R_p} \Rightarrow R_p = \frac{U^2}{P}$$



$$P = \omega C_p U^2 \operatorname{tg} \delta \Rightarrow C_p = \frac{P}{\omega U^2 \operatorname{tg} \delta}$$

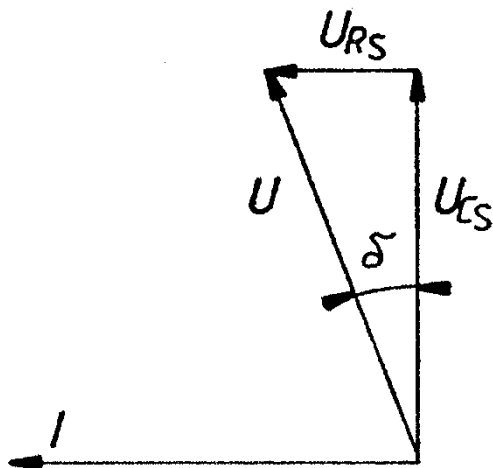
VÁLTAKOZÓFESZÜLTSÉGEN FELLÉPŐ JELENSÉGEK

Soros helyettesítő kapcsolás



$$U_R = IR_s \quad \text{és} \quad U_c = I / \omega C_s$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_R}{U_c} = \frac{IR_s}{I / \omega C_s} = \omega R_s C_s$$



$$P = \frac{U_R^2}{R_s} = \frac{U^2}{R_s} \sin^2 \delta \Rightarrow R_s = \frac{U^2}{P} \sin^2 \delta$$

$$P = IU_R = \omega C_s U^2 \cos^2 \delta \operatorname{tg} \delta \Rightarrow C_s = \frac{P}{\omega U^2 \operatorname{tg} \delta} \frac{1}{\cos^2 \delta}$$

VÁLTAKOZÓFESZÜLTSÉGEN FELLÉPŐ JELENSÉGEK

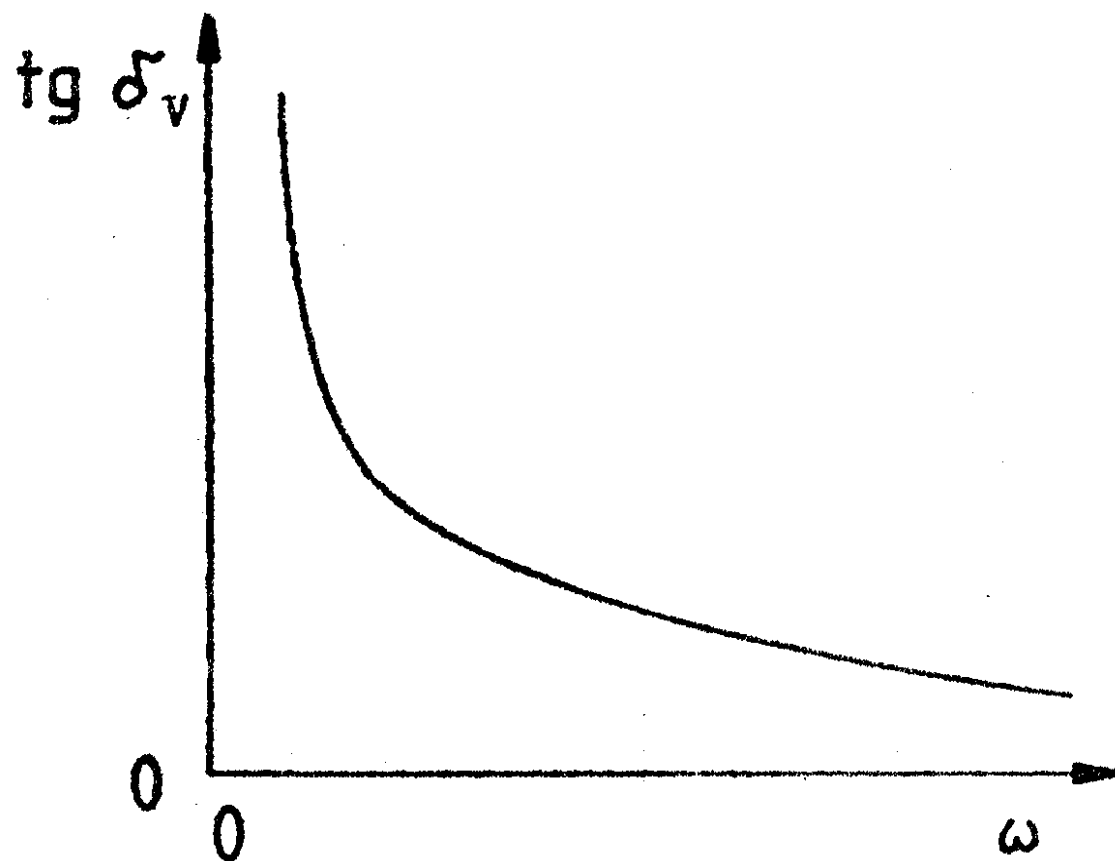
A párhuzamos és soros helyettesítő kapcsolások összehasonlítása

$$R_s = R_p \sin^2 \delta \qquad C_s = C_p \frac{1}{\cos^2 \delta}$$

Mivel δ kicsi, ezért $\cos \delta \approx 1$ és $\sin \delta \ll 1$

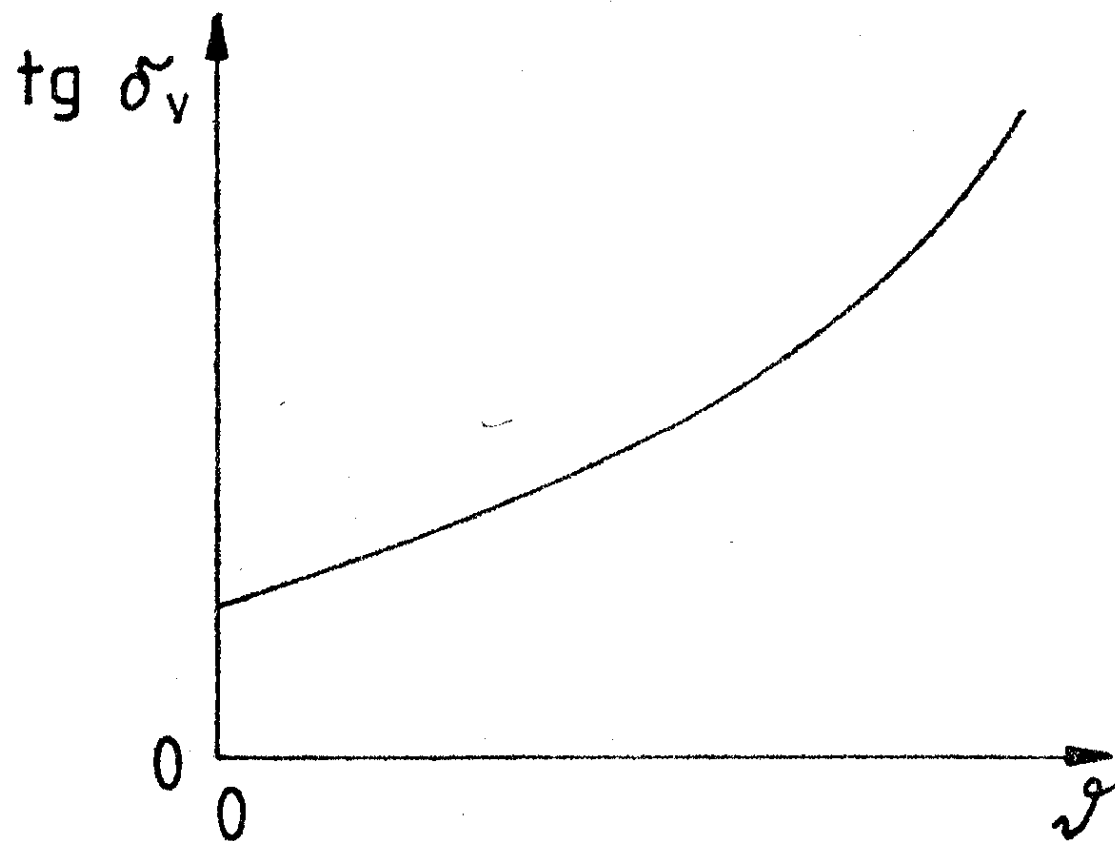
$$R_s \ll R_p \qquad C_s \approx C_p$$

VÁLTAKOZÓFESZÜLTSGÉN FELLÉPŐ JELENSÉGEK



- A vezetésből eredő
veszteségi tényező
frekvenciafüggése

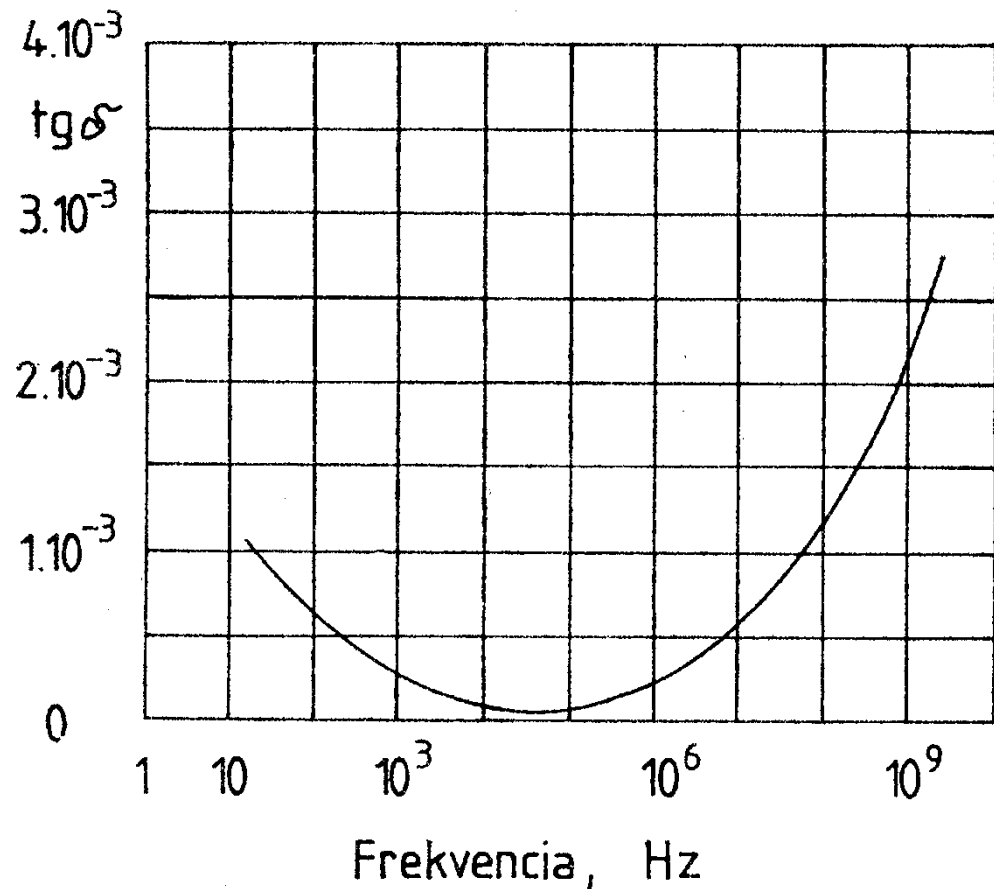
Váltakozófeszültségen fellépő jelenségek



A vezetésből eredő
veszteségi tényező
hőmérsékletfüggése

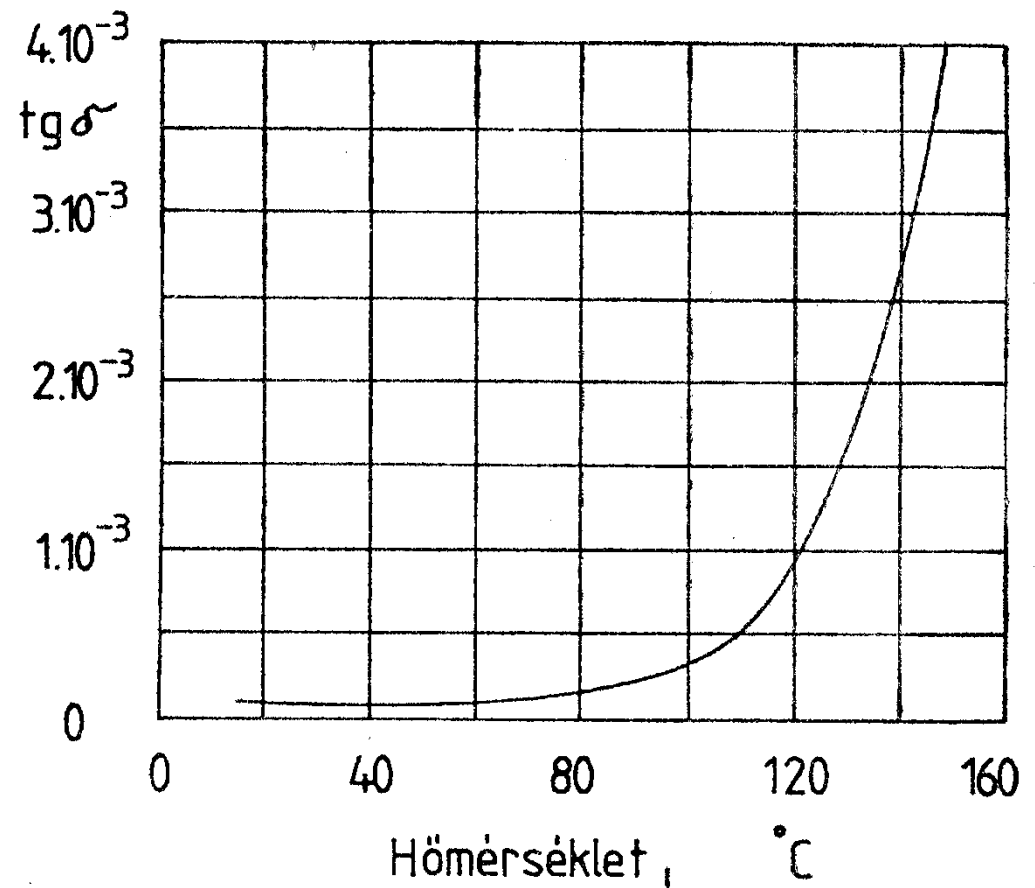
VÁLTAKOZÓFESZÜLTSGÉN FELLÉPŐ JELENSÉGEK

- Transzformátorolaj
veszteségi
tényezője a
frekvencia
függvényében

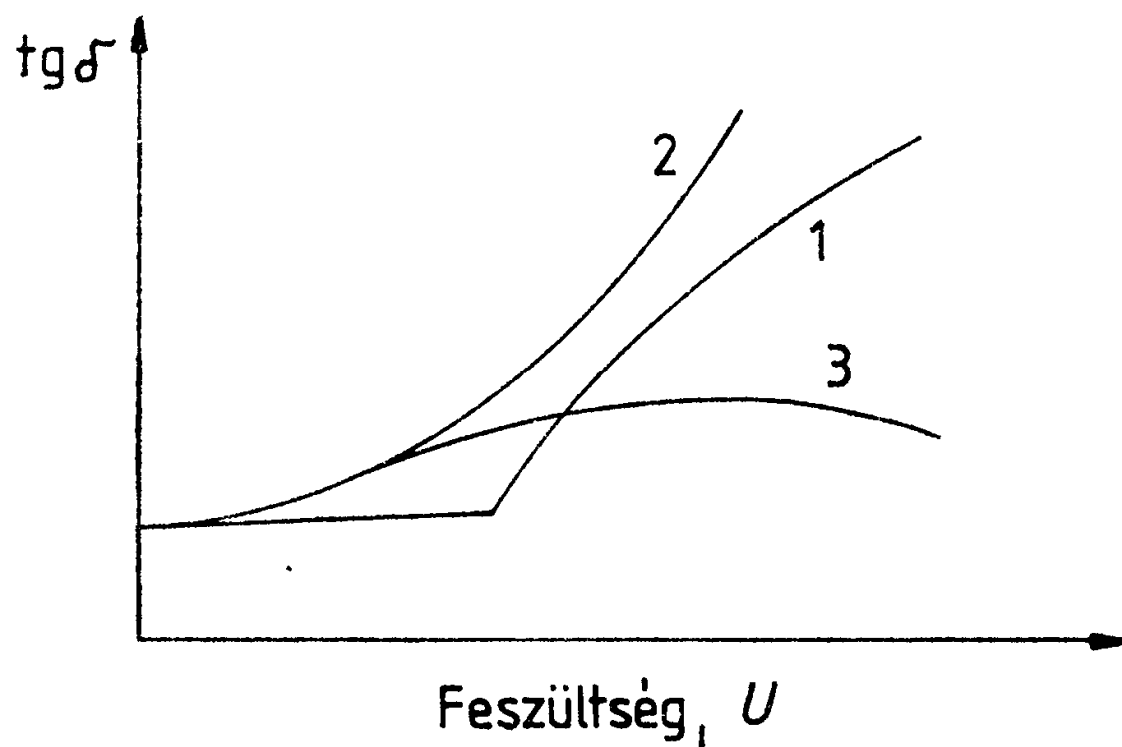


VÁLTAKOZÓFESZÜLTSGÉN FELLÉPŐ JELENSÉGEK

- Transzformátorolaj
veszteségi
tényezője a
hőmérséklet
függvényében



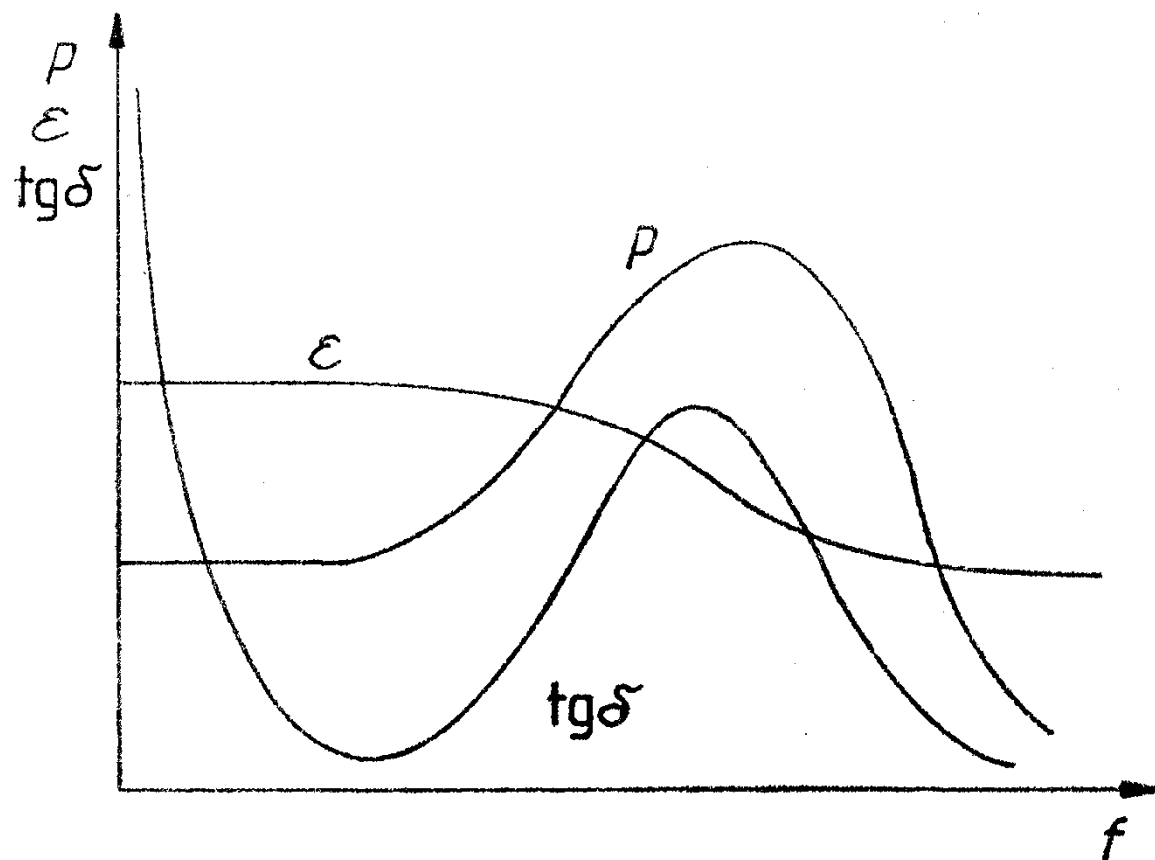
VÁLTAKOZÓFESZÜLTTSÉGEN FELLÉPŐ JELENSÉGEK



Impregnált papír

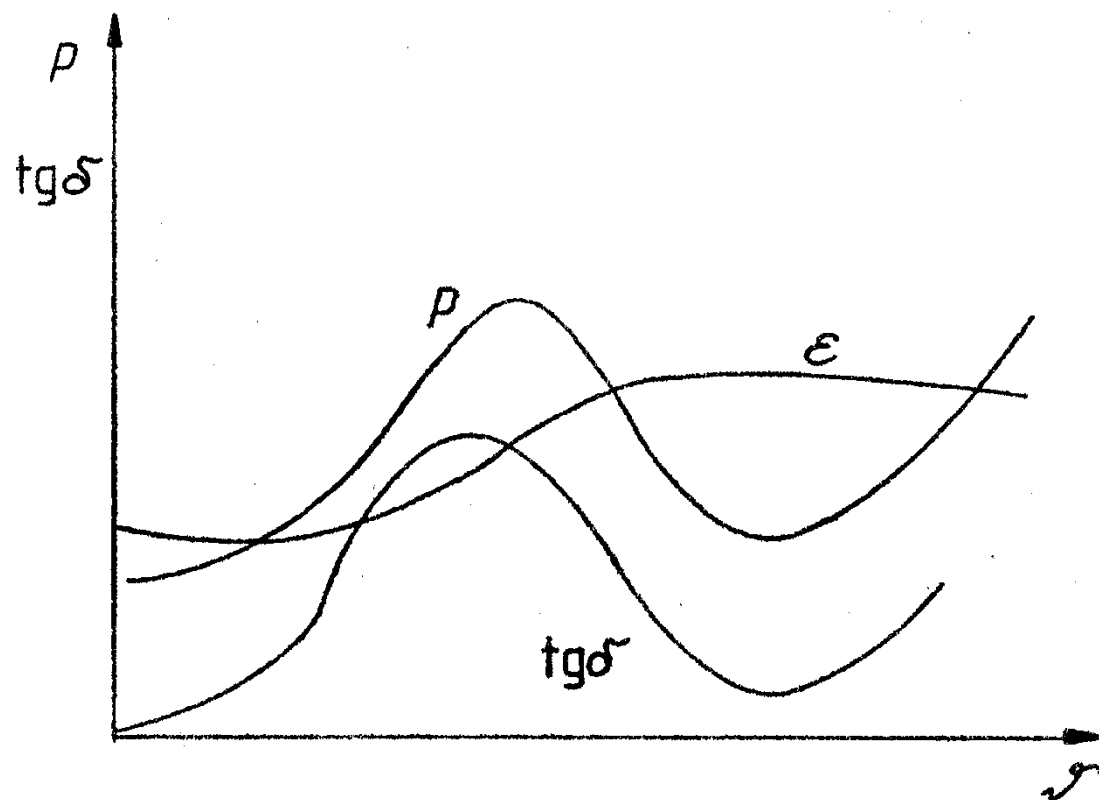
- 1 belső kisülés
- 2 szennyezés
- 3 Galton-hatás

VÁLTAKOZÓFESZÜLTSGÉN FELLÉPŐ JELENSÉGEK



A térfogati
veszteségi szám
frekvenciafüggése

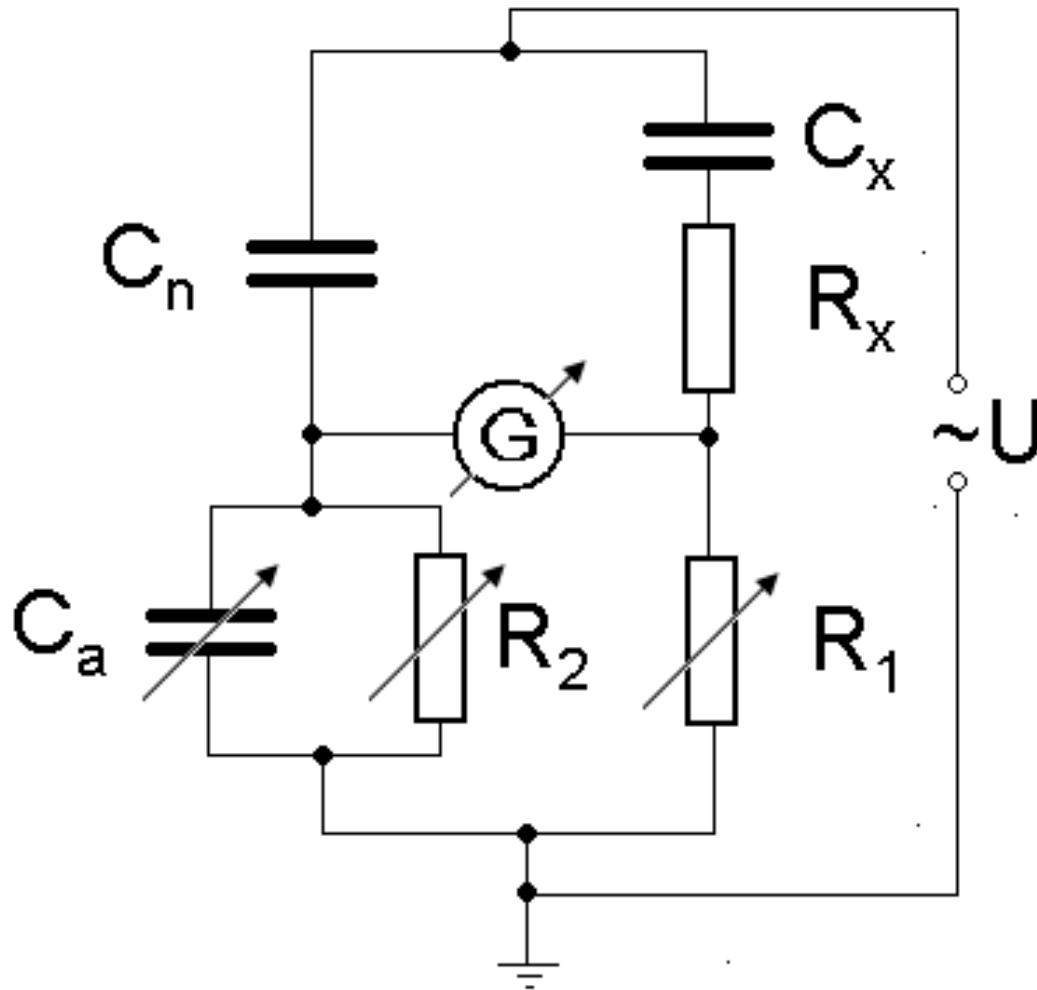
VÁLTAKOZÓFESZÜLTSÉGEN FELLÉPŐ JELENSÉGEK



A térfogati
veszteségi szám
hőmérséklet-
függése

A VESZTESÉGI TÉNYEZŐ ÉS A PERMITTIVITÁS MÉRÉSE

Schering híd



$$Z_n Z_1 = Z_2 Z_x$$

$$Z_1 = R_1$$

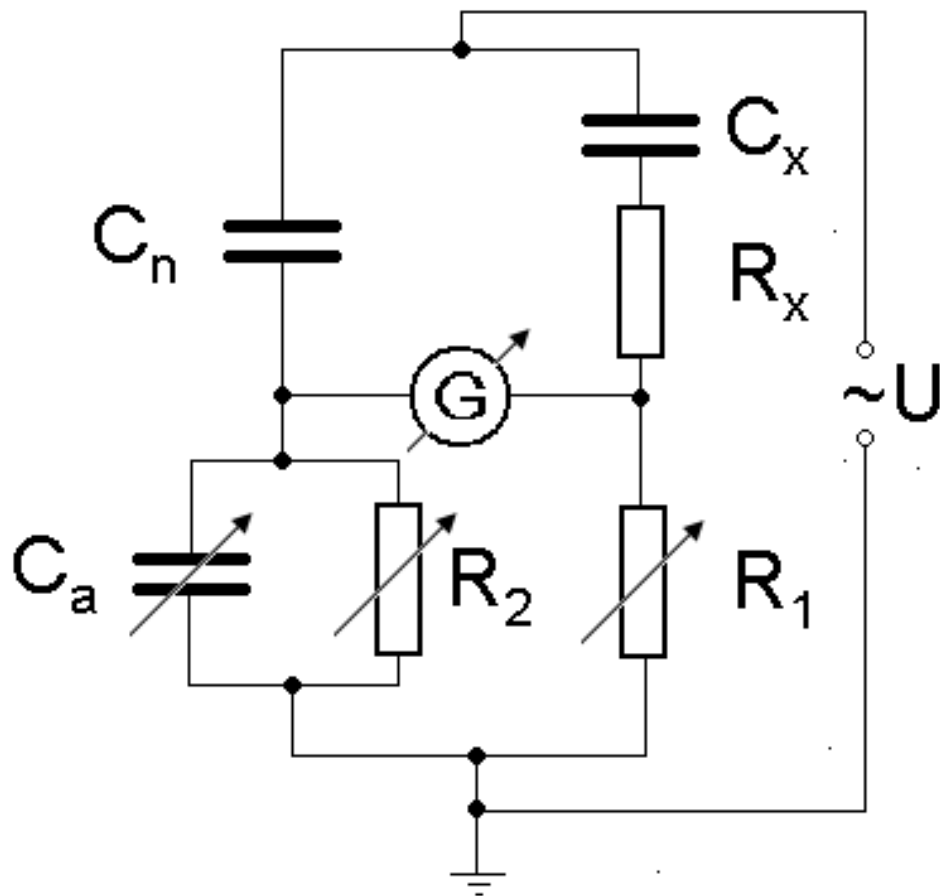
$$Z_x = R_x + \frac{1}{j\omega C_x}$$

$$\frac{1}{Z_2} = \frac{1}{R_2} + j\omega C_a$$

$$\frac{1}{Z_n} = j\omega C_n$$

A VESZTESÉGI TÉNYEZŐ ÉS A PERMITTIVITÁS MÉRÉSE

Schering híd



$$\frac{R_1}{R_2} + j\omega C_a R_1 = \frac{C_n}{C_x} + j\omega C_n R_x$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{C_n}{C_x} \Rightarrow C_x = C_n \frac{R_2}{R_1}$$

$$C_a R_1 = C_n R_x$$

$$\omega R_2 C_a = \omega R_2 C_n \frac{R_x}{R_1} = \omega C_x R_x$$

$$\operatorname{tg} \delta = \omega R_2 C_a$$

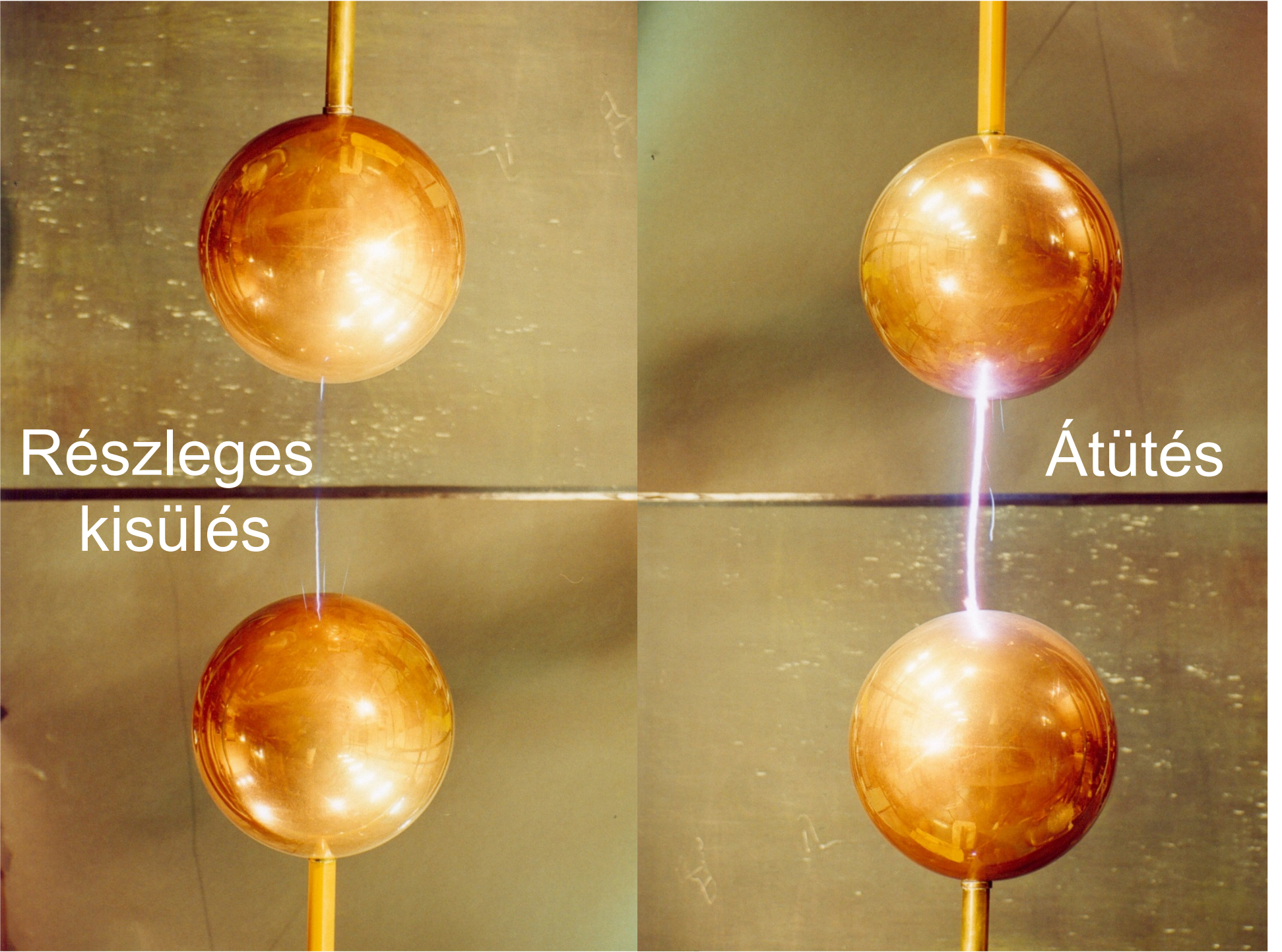
Kisülési jelenségek

KISÜLÉSEK

Gázokban

Szilárd szigetelőanyagokban

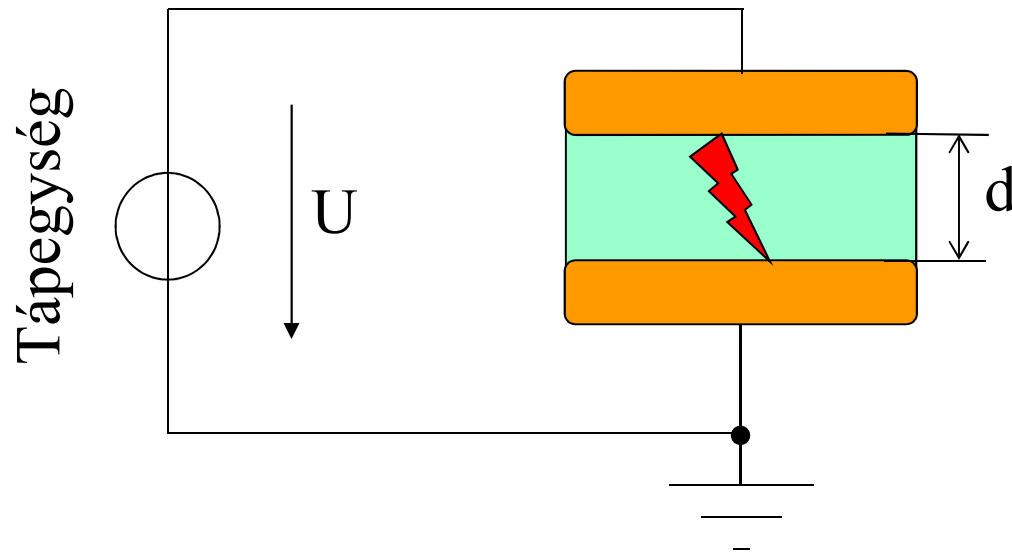
Folyadékokban



Részleges
kisülés

Átütés

ELEKTRÓDTÓL ELEKTRÓDIG TERJEDŐ VILLAMOS KISÜLÉSEK



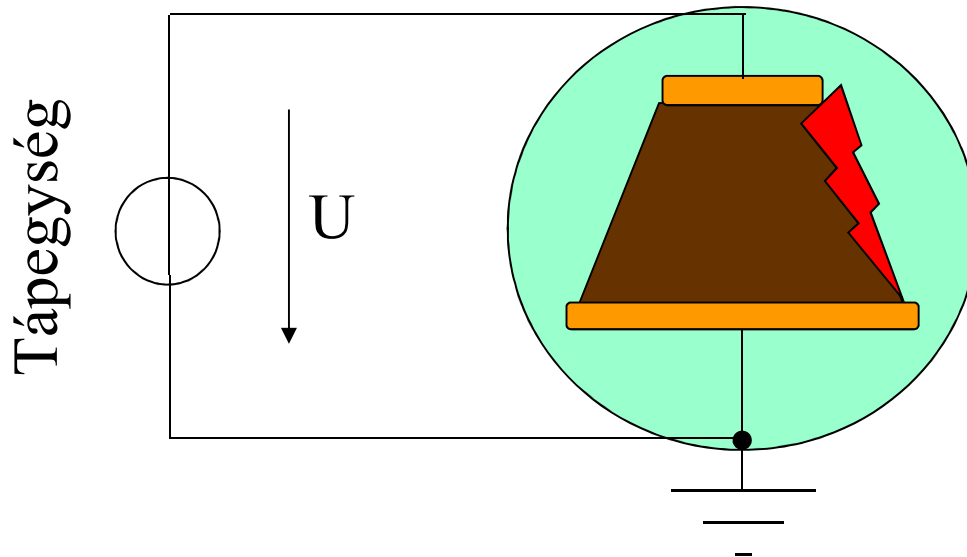
A szigetelő belsejében:

ÁTÜTÉS

Villamos szilárdság:

$$E_{\ddot{u}} = U_{\ddot{u}}/d$$

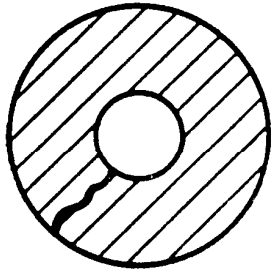
(ív csak adott áram felett)



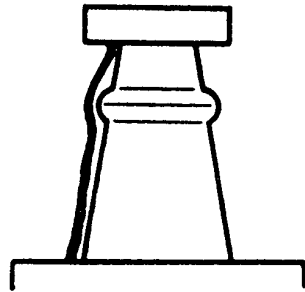
Két szigetelő anyag
határfelületén:

ÁTÍVELÉS

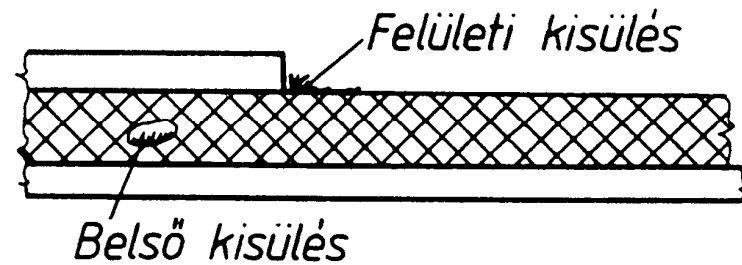
A KISÜLÉSEK ALAPTÍPUSAI



beágyazott típusú
szigetelés



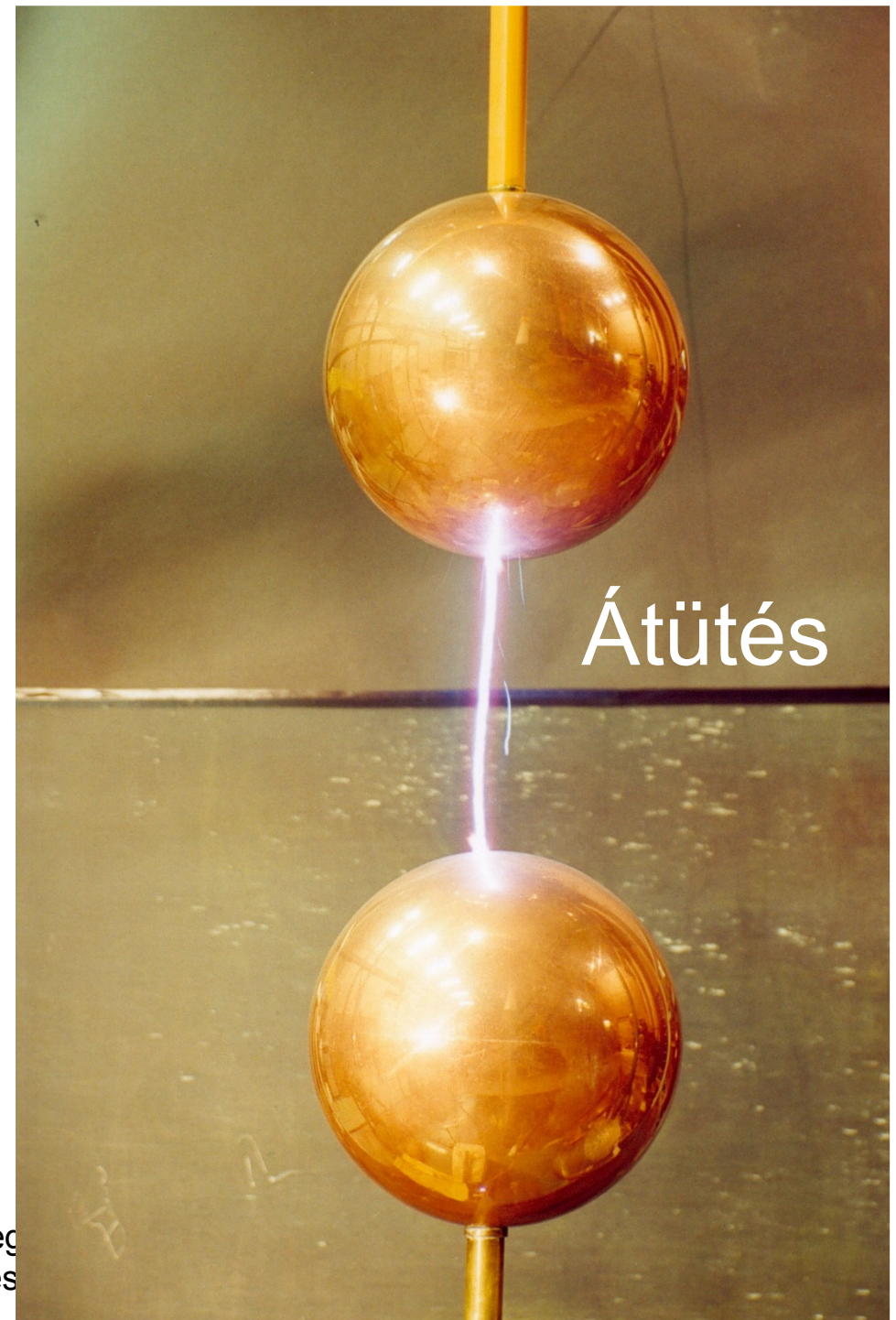
támszigetelő típusú
szigetelés



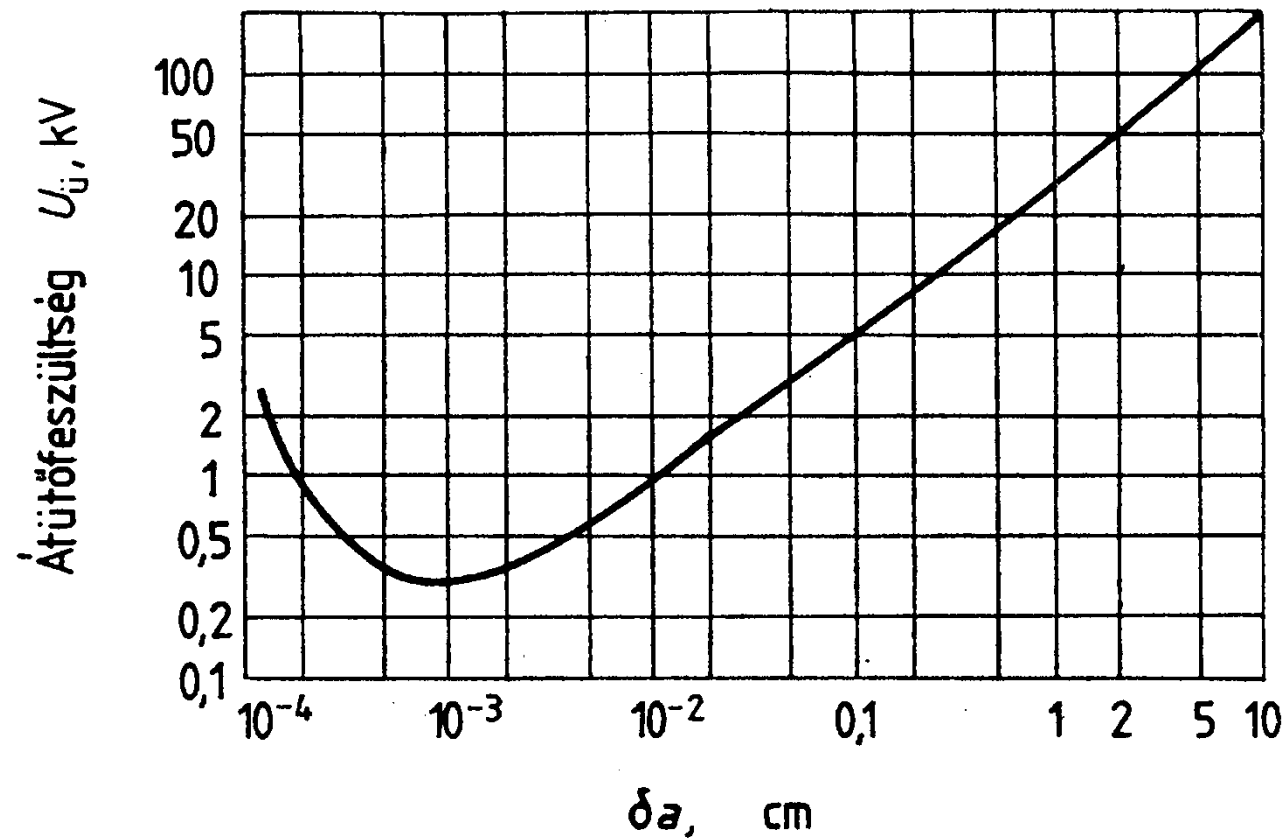
részben beágyazott, vagy átvezető
típusú szigetelés

Ha nincs
töltésutánpótlás
SZIKRAKISÜLÉS
(kondenzátor
kisülés)

Nagyfeszültség
Berendezés

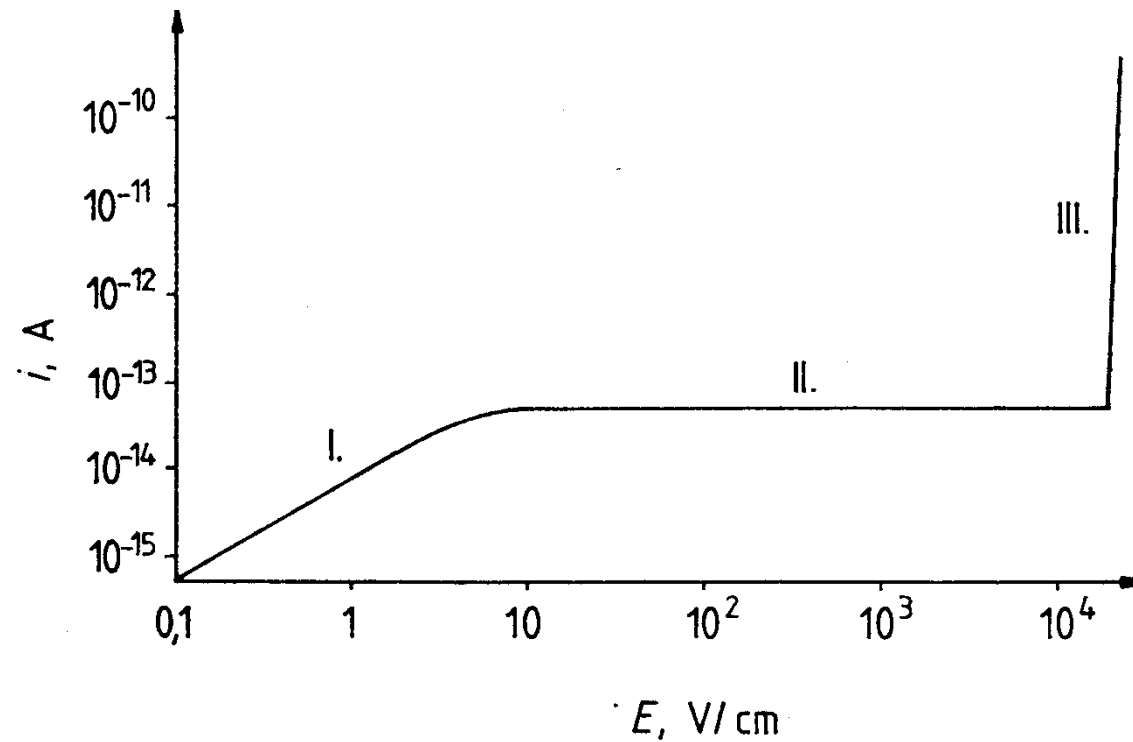


PASCHEN-GÖRBE LEVEGŐRE

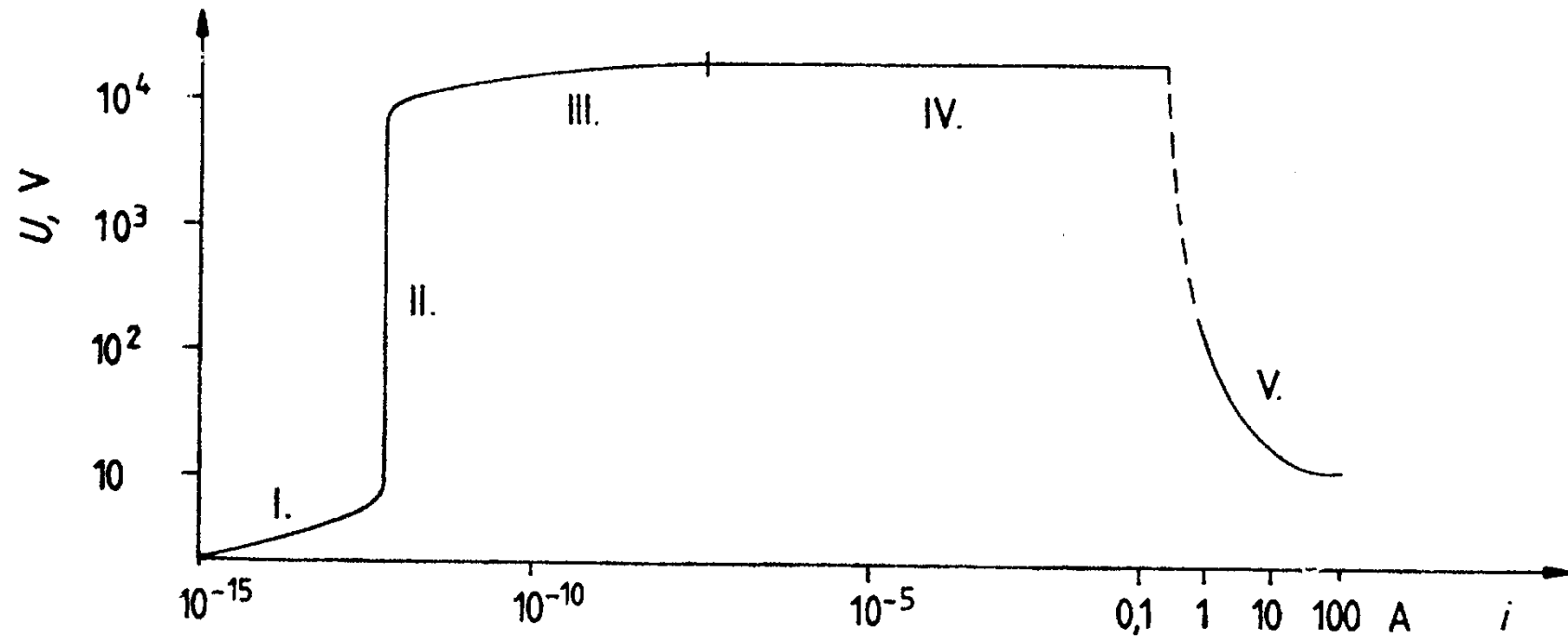


GÁZKISÜLÉSEK

Térerősség hatására a gázokban folyó áram



U-I KARAKTERISZTIKA HOMOGÉN ERŐTÉRBEN



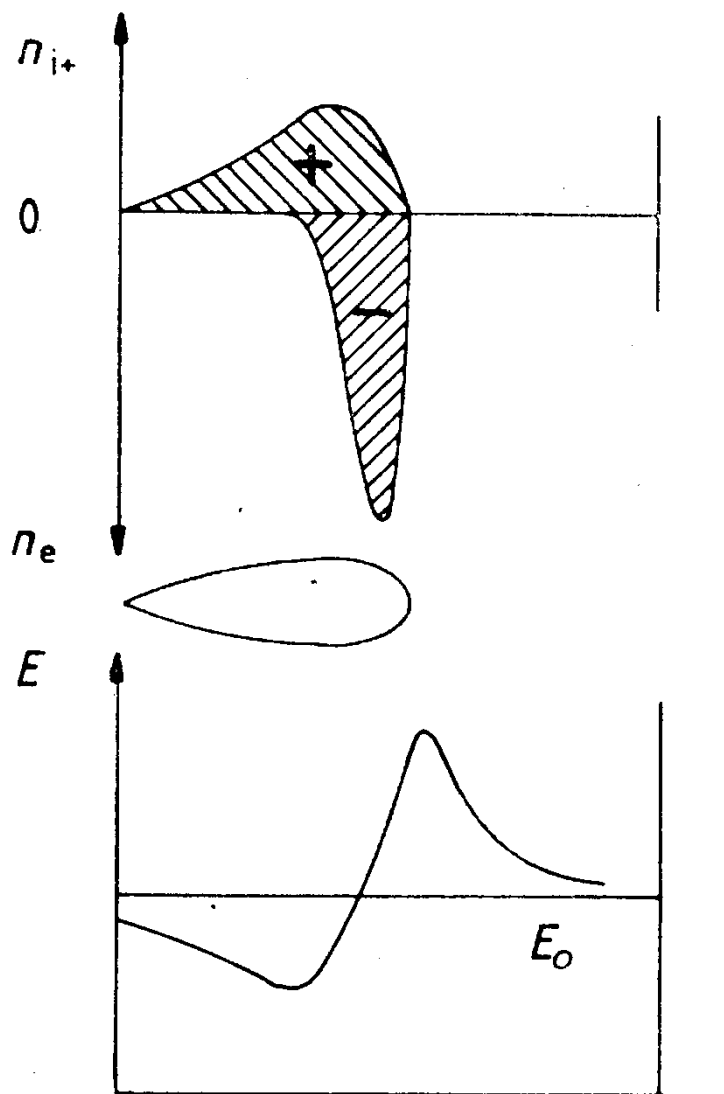
Korona kisülés

Nem pontos fizikai fogalom, csak azt jelenti, hogy az elektródon részleges kisülés lép fel.



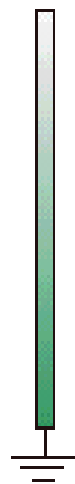
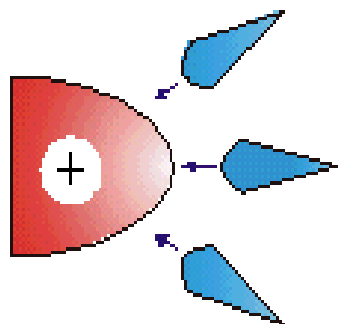
Elektronlavina



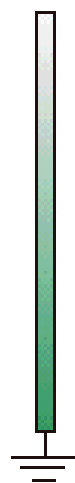
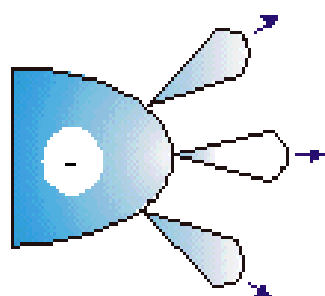
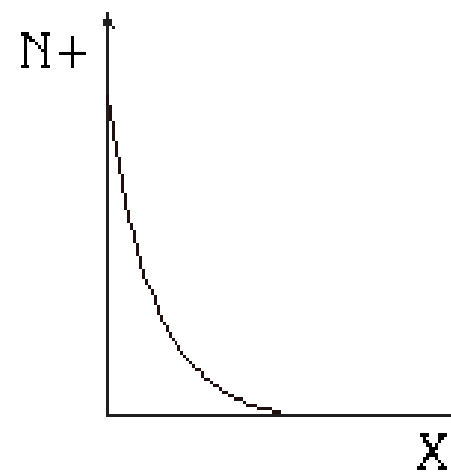
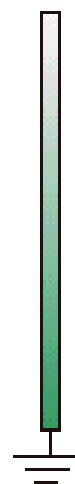


a) Az elektronlavina által
okozott erőértorzulás

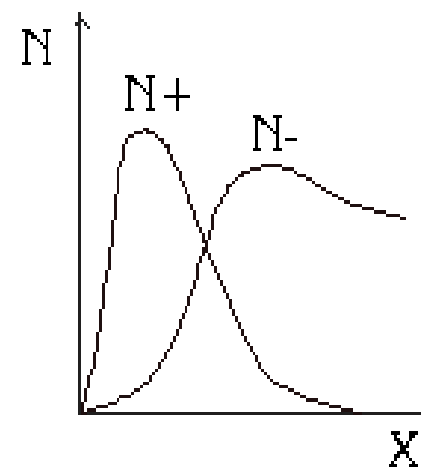
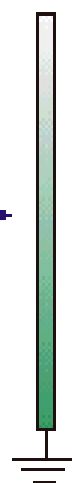
b)



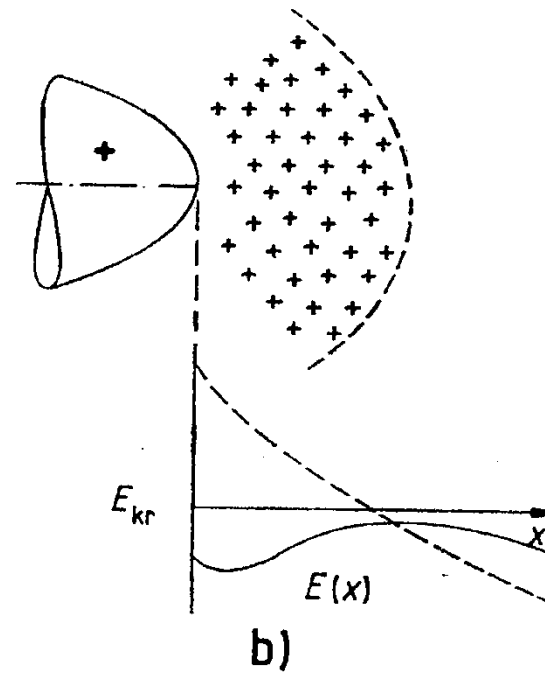
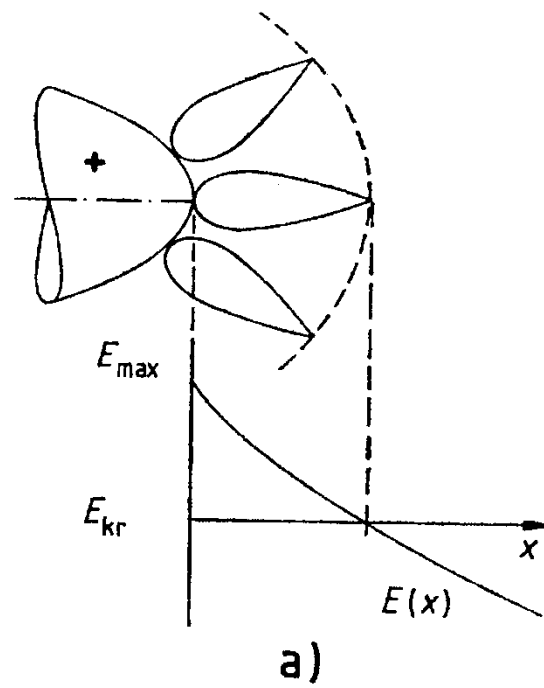
Pozitív korona



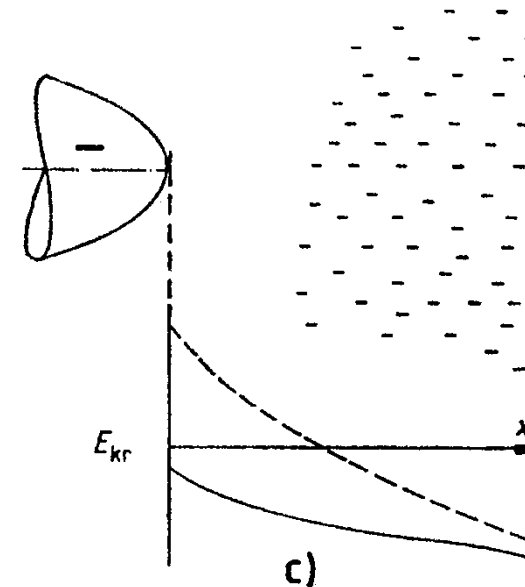
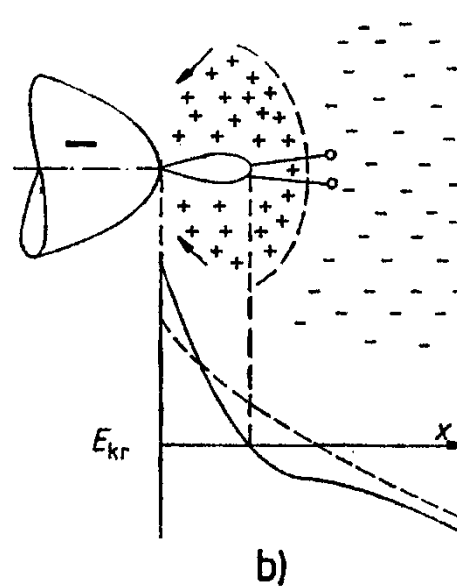
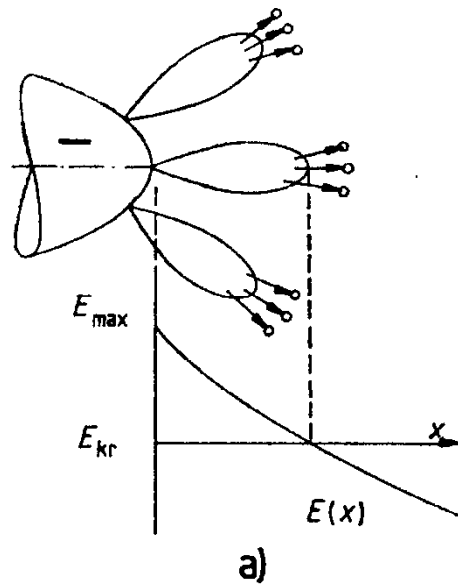
Negatív korona



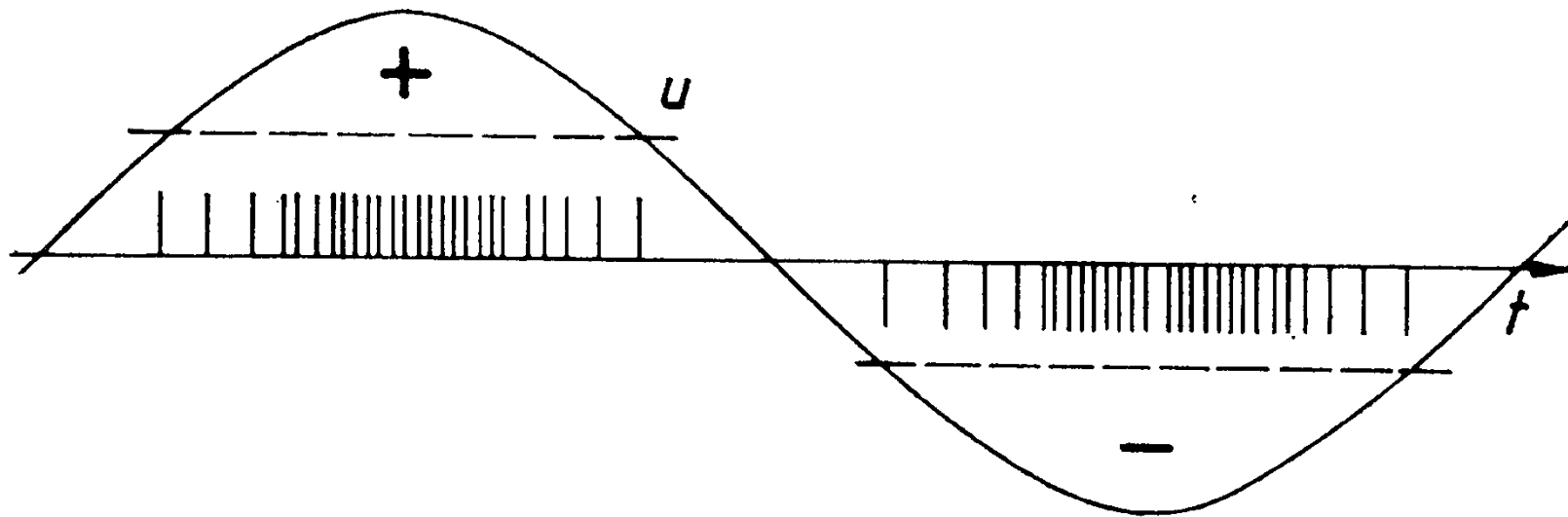
KORONAKISÜLÉS POZITÍV CSÚCSON

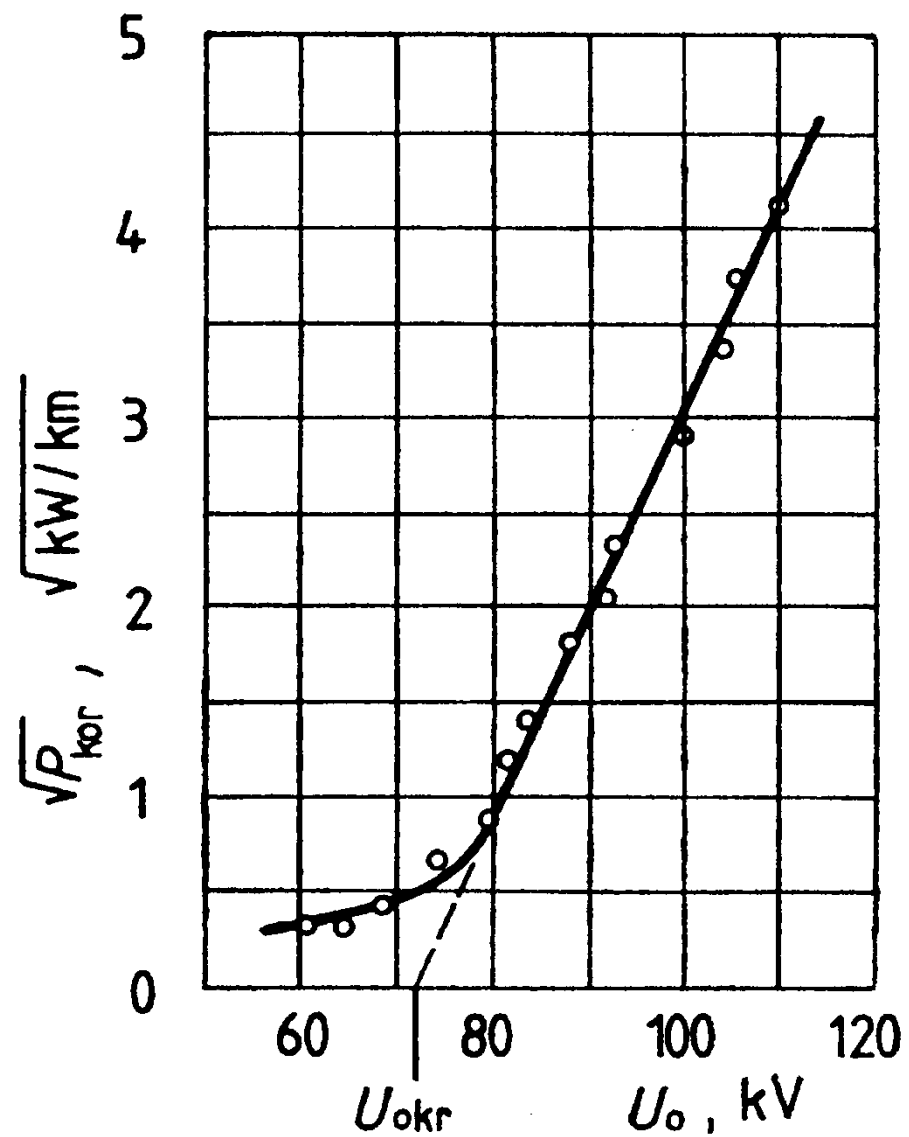


KORONAKISÜLÉS NEGATÍV CSÚCSON



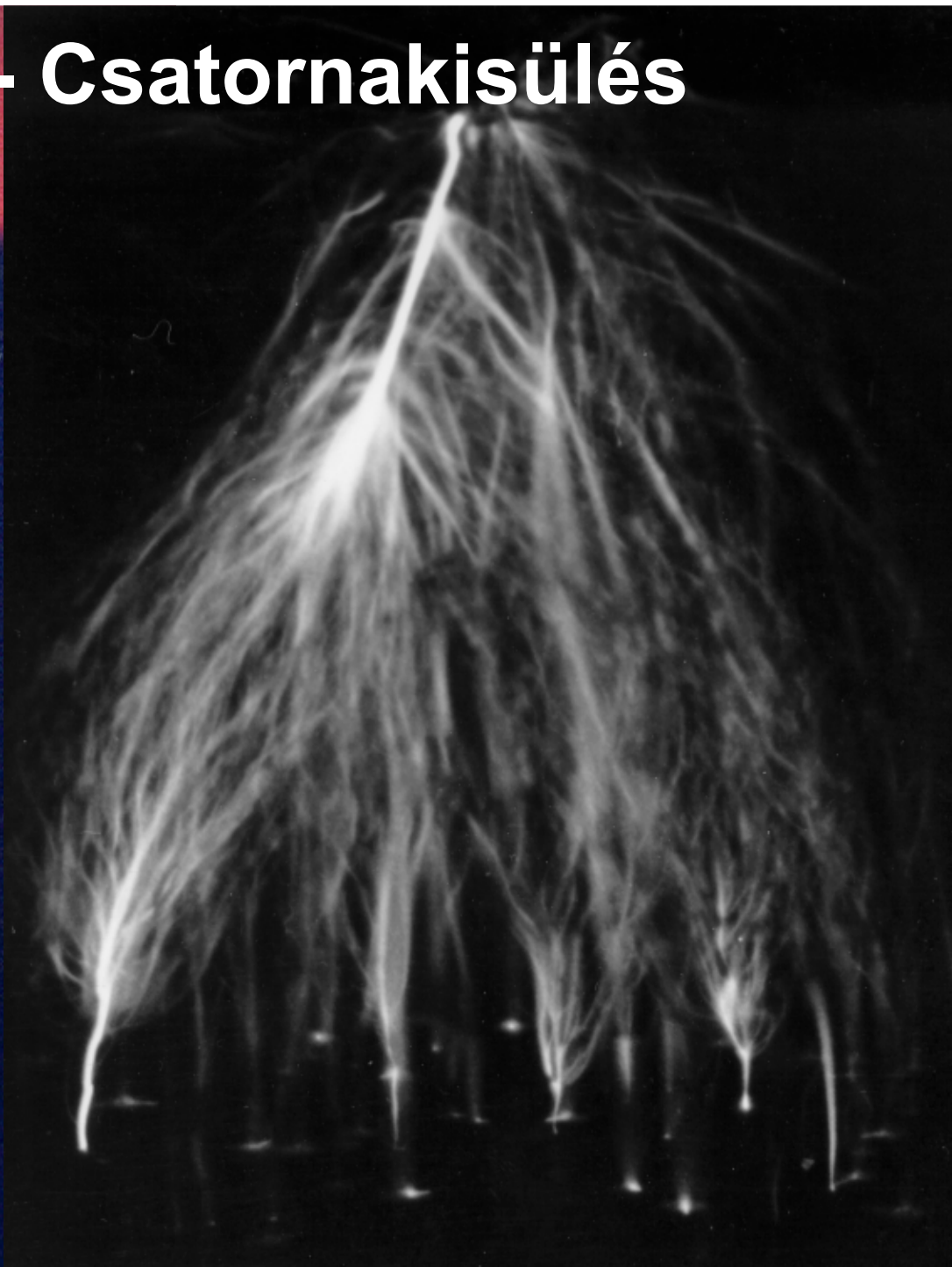
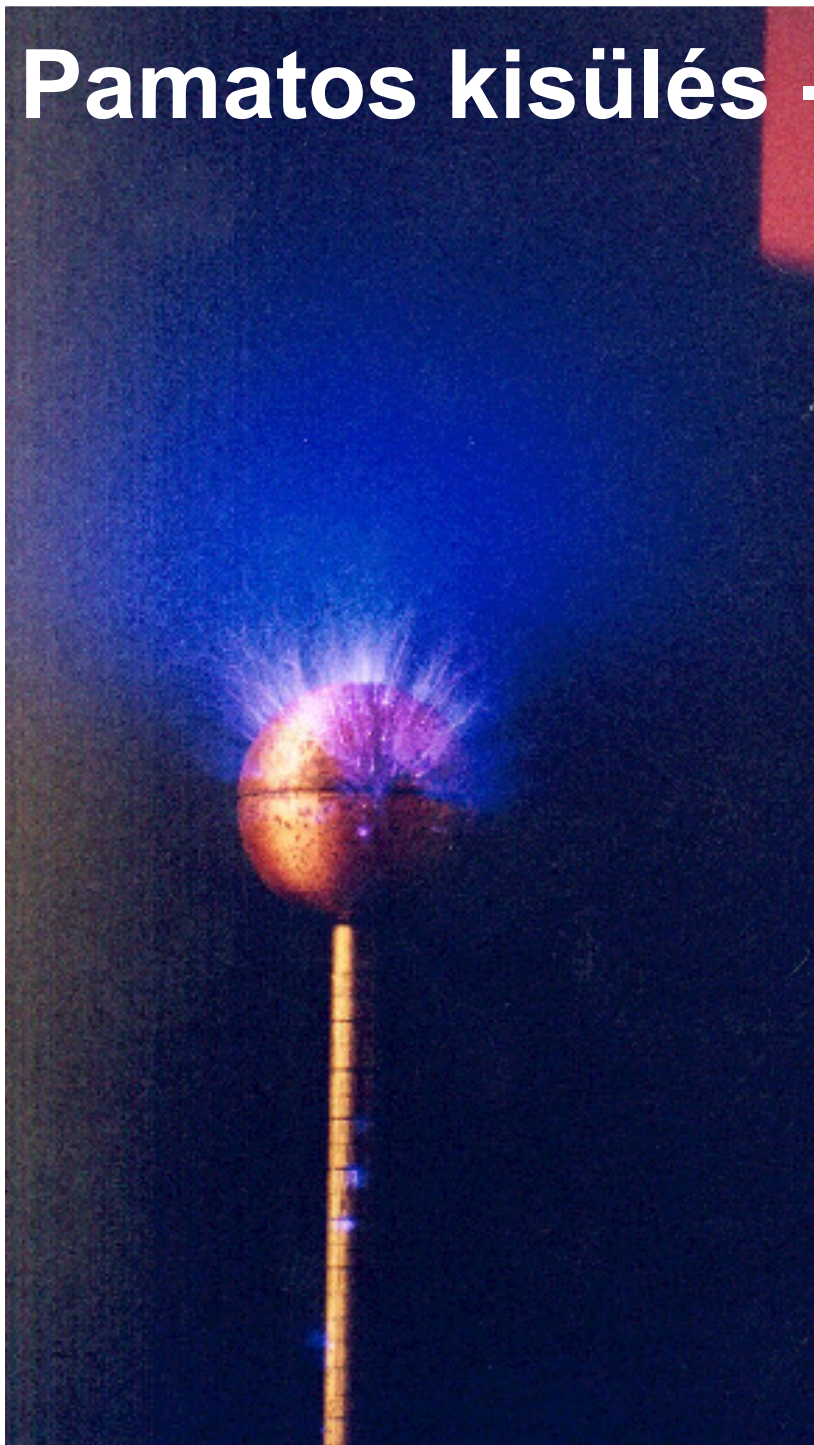
KORONAKISÜLÉS VÁLTAKOZÓ FESZÜLTSÉGEN



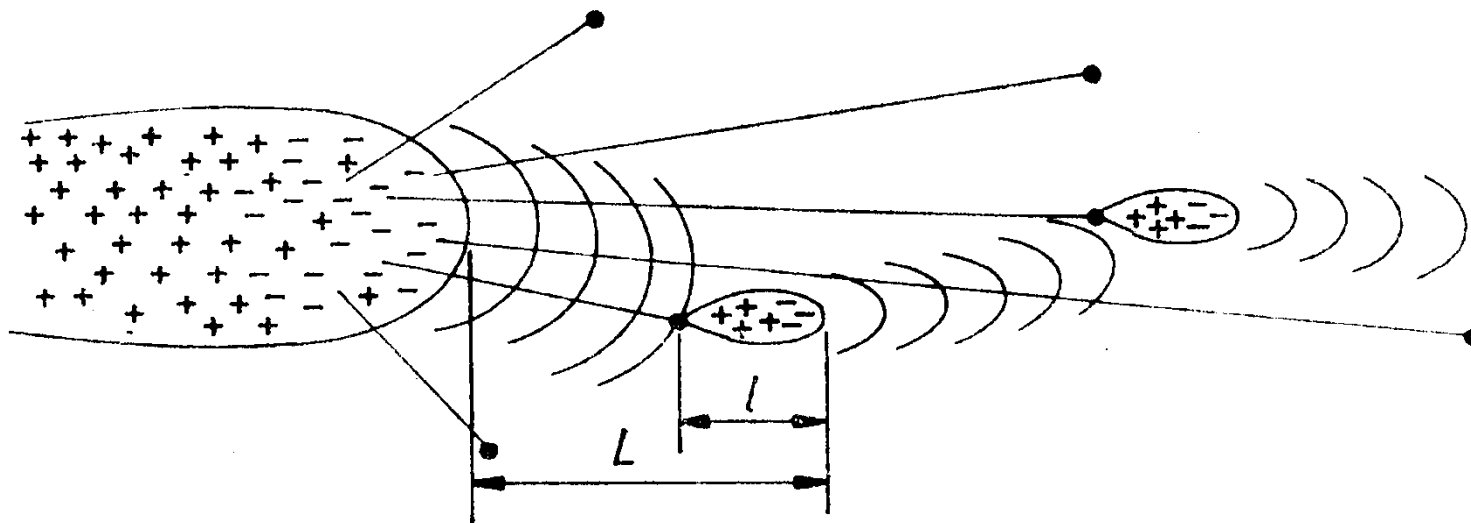


A távvezetéken keletkező
koronaveszteség alakulása

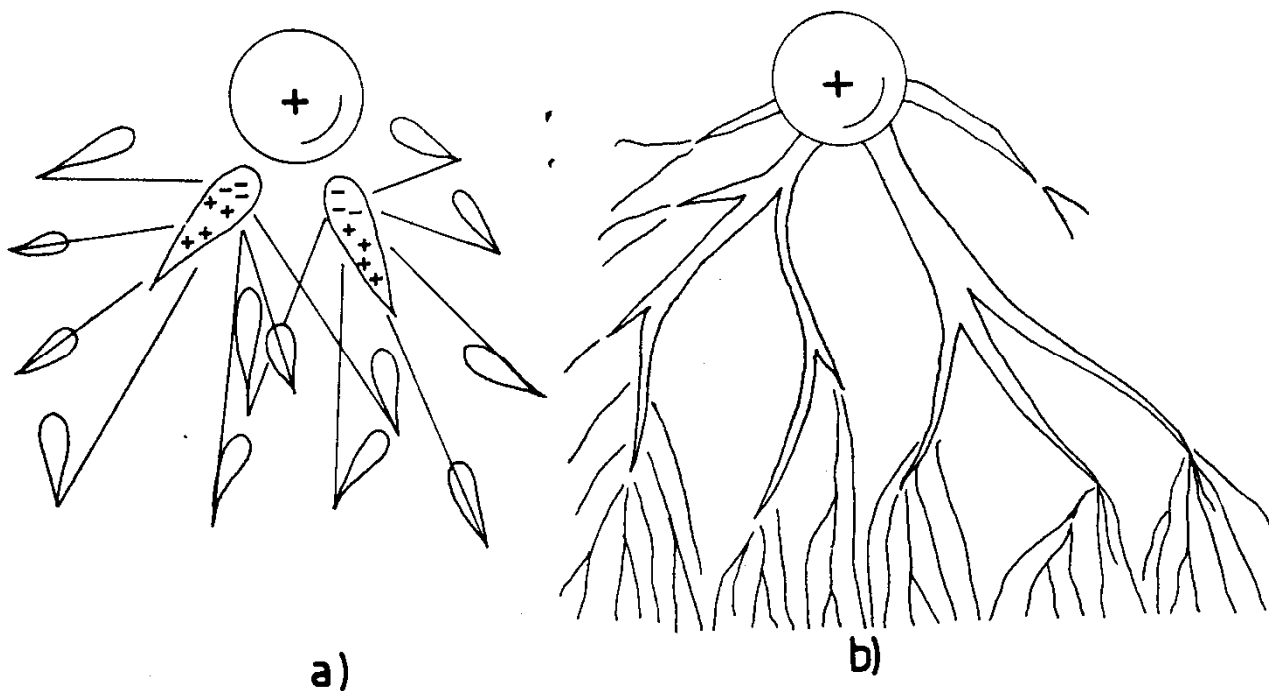
Pamatos kisülés - Csatornakisülés



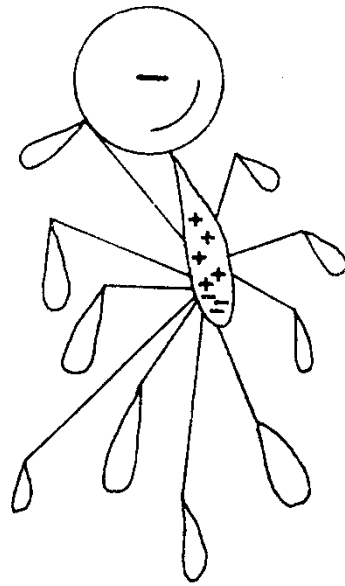
AZ ANÓDIRÁNYÚ CSATORNA FEJLŐDÉSE



PAMATOS KISÜLÉS KIALAKULÁSA POZITÍV GÖMBÖN



PAMATOS KISÜLÉS KIALAKULÁSA NEGATÍV GÖMBÖN

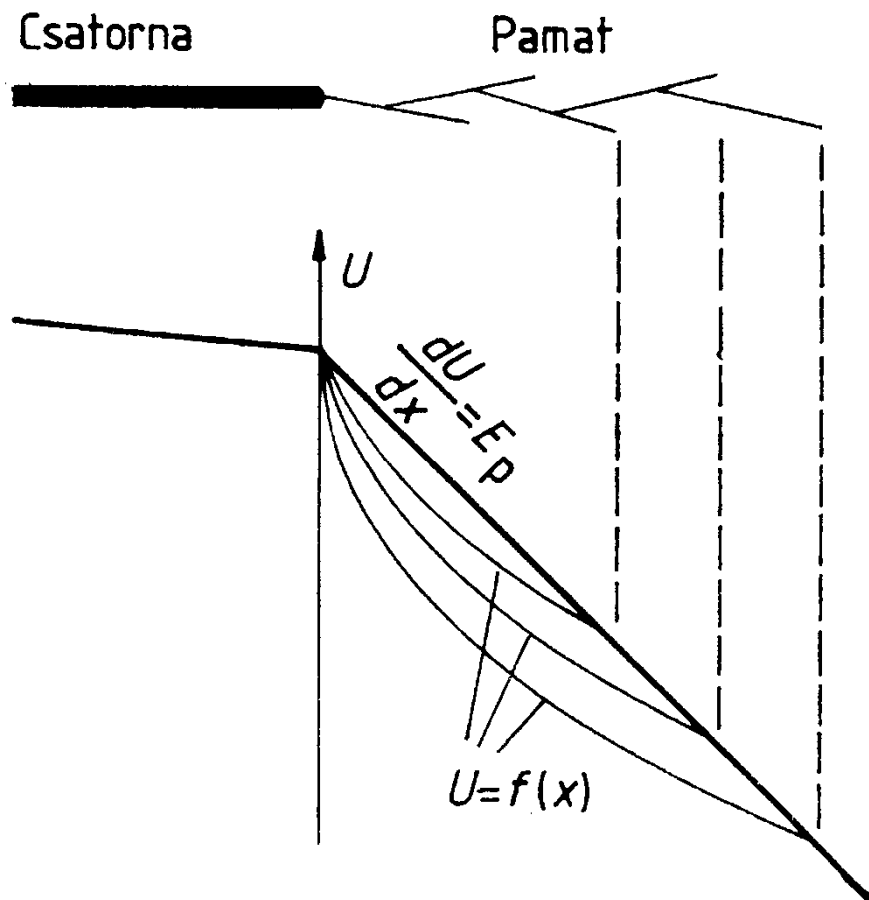


a)



b)

A CSATORNA VÉGÉN LÉVŐ PAMATOS KISÜLÉS POTENCIÁLVISZONYAI

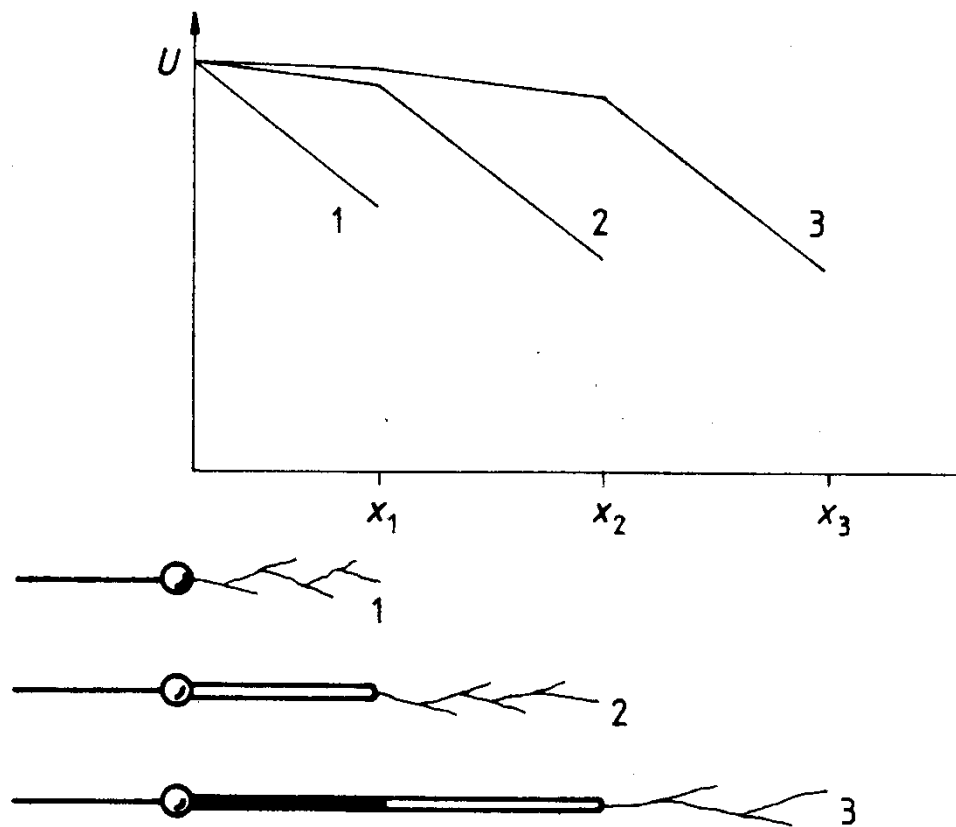


elektron lavina: $E > 30 \text{ kV/cm}$
ütközési ionozás

pamatos kisülés: $E = 5 \dots 6 \text{ kV/cm}$
ütközési ionozás
foto ionozás

csatorna kisülés: $E \leq 1 \text{ kV/cm}$
foto ionozás
hőionozás

A FESZÜLTÉGVISZONYOK ERŐSEN INHOMOGÉN ERŐTÉRBEN



Ha van
töltésutánpótlás



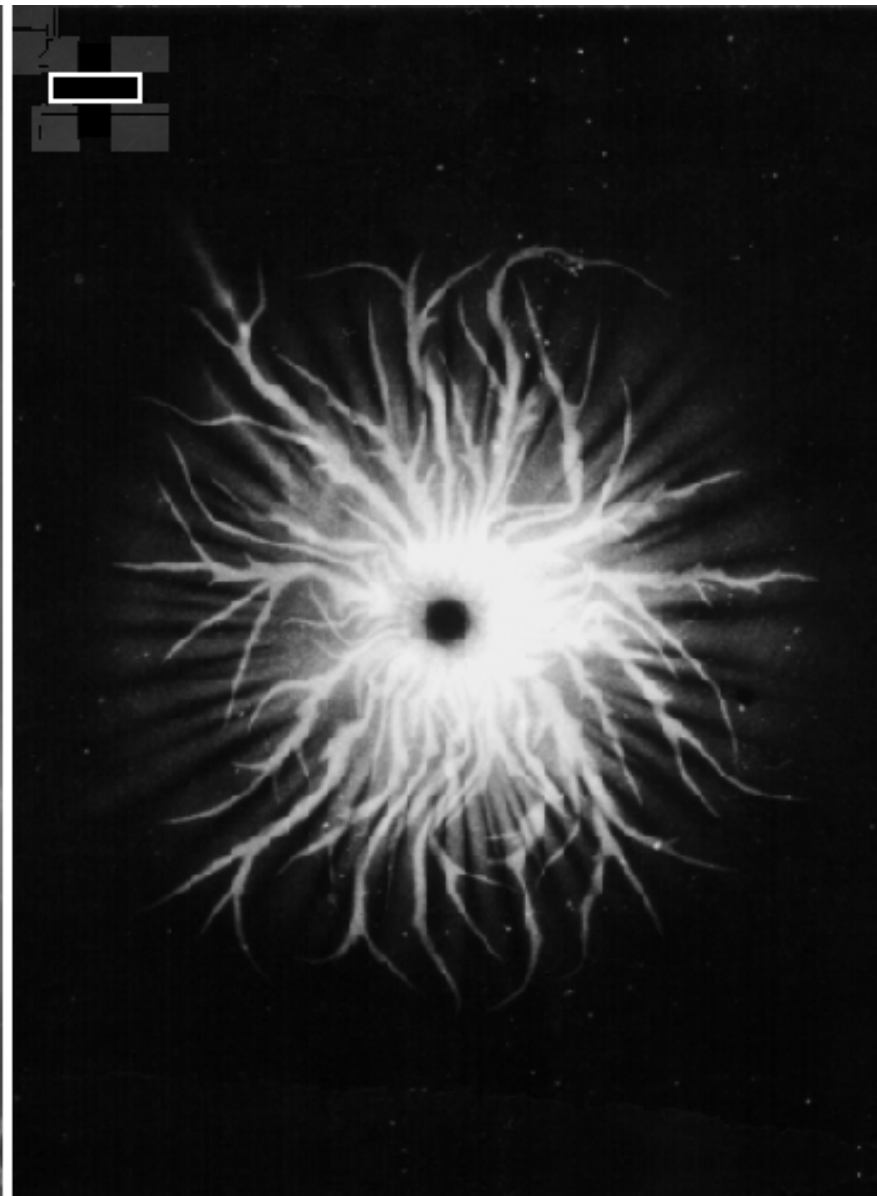
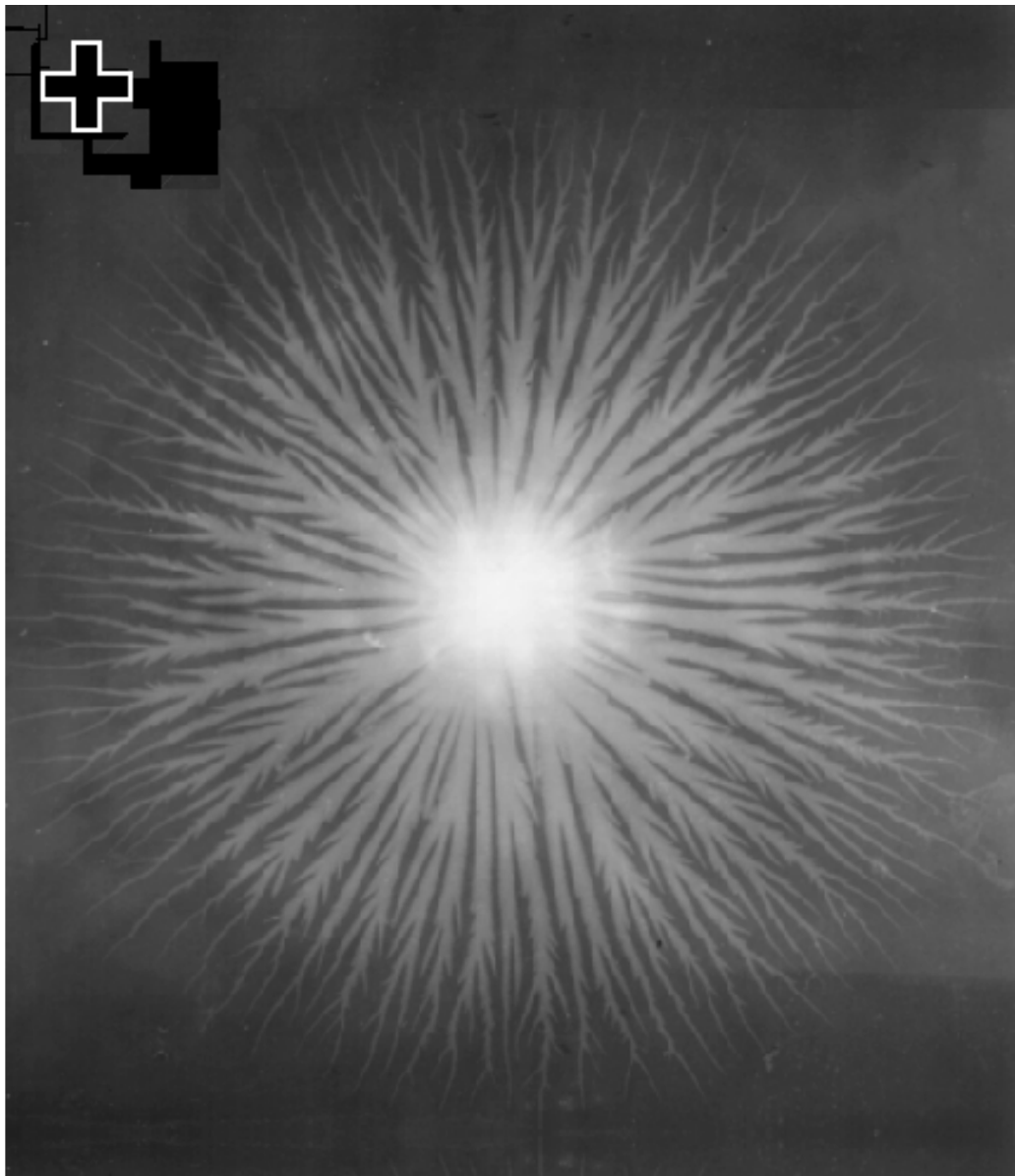
**Villamos
ív**

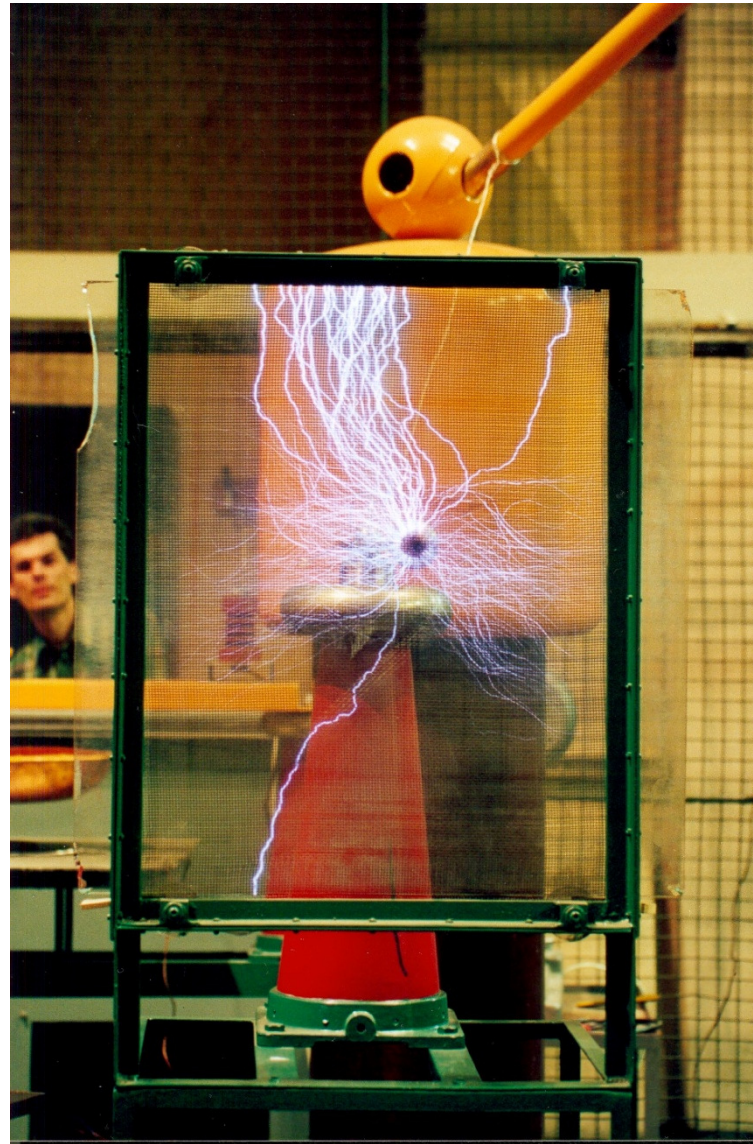
Villamos kisülések	Jellemző hőmérséklet	Töltéshordozókat termelő fizikai folyamatok
Elektronlavina	20-30 °C	Elektronütközési ionozás
Pamatos kisülés	100 °C	Elektronütközési ionozás + fotoionozás
Csatorna kisülés	1000 °C	Fotoionozás + hőionozás
Villamos ív	10 000 °C	Hőionozás + hőemisszió

RÉSZLETÖRÉSEK a szigetelőanyag - az erőter inhomogenitása miatt - csak egy adott térrészben veszíti el szigetelőképességét.

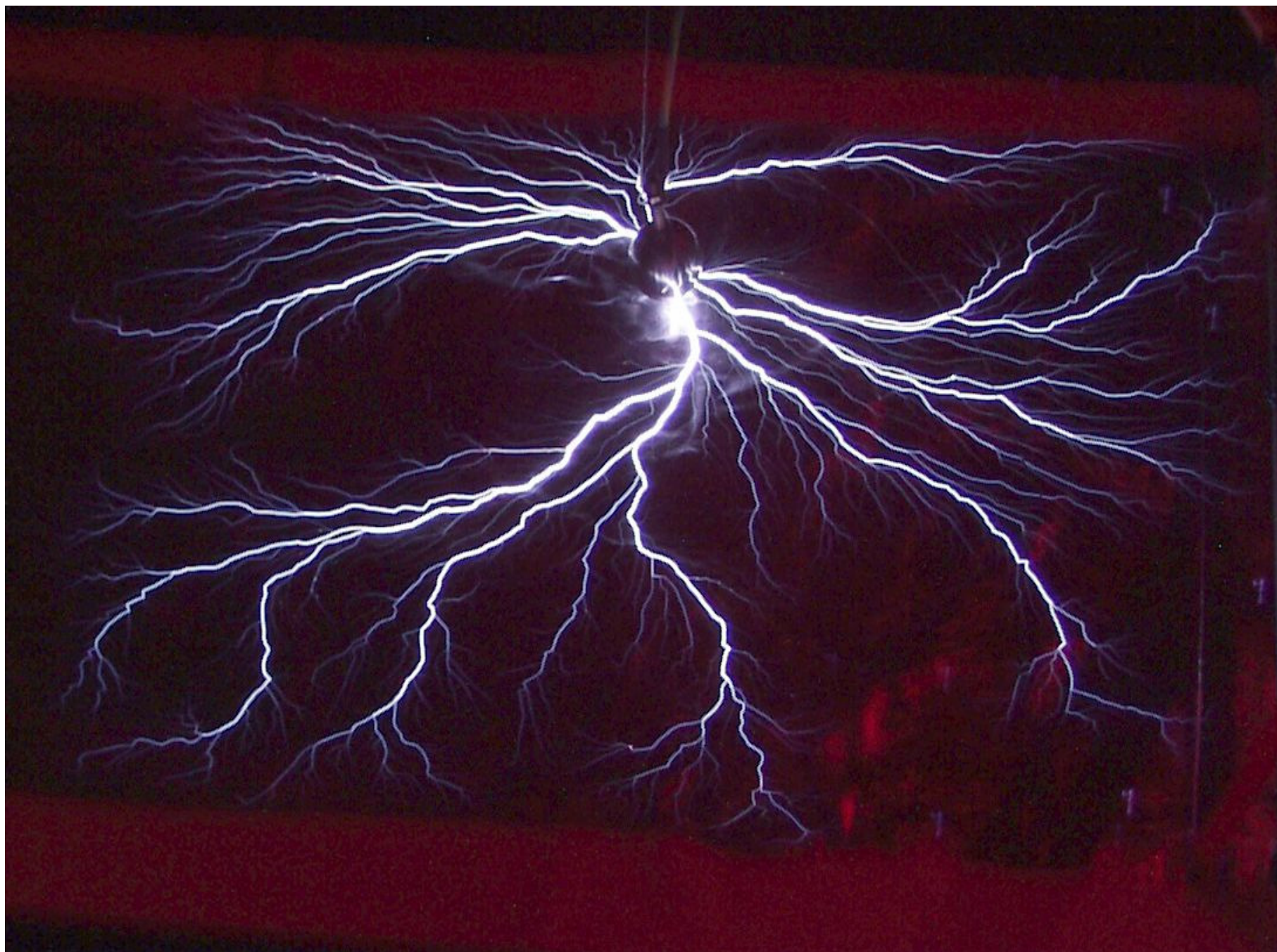
- Élek, csúcsok, hegyes fémalkatrészek: koronakisülés
Erősen inhomogén erőter: $E_{\max} \gg E_{\min}$
- Szigetelőanyagok határfelülete: felületi v. kúszó kisülés
- Szilárd szigetelőanyagok belseje: treeing
- Szigetelőanyagon belüli zárványok: belső v. üregkisülés

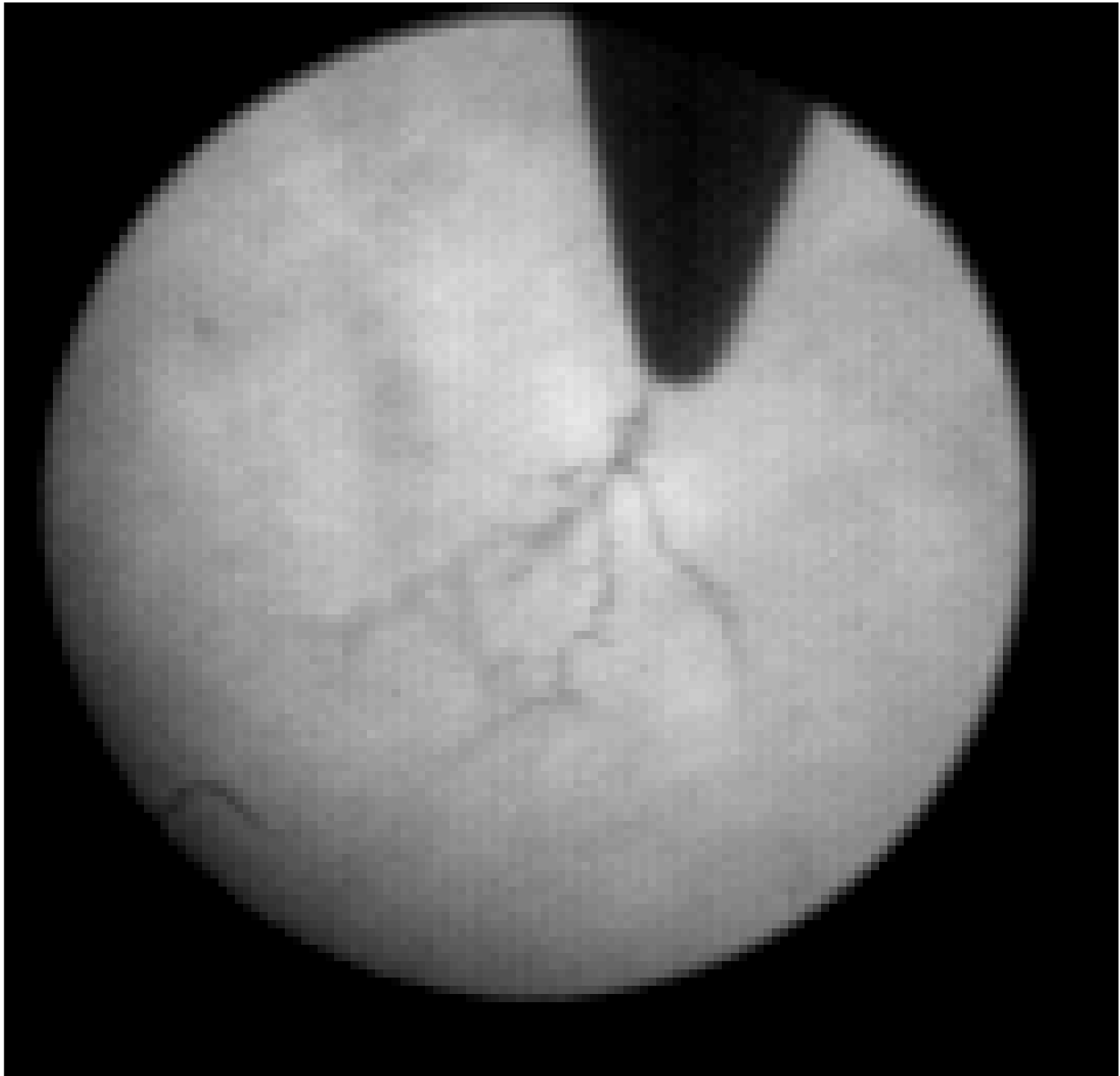
Felületi, vagy kúszó kisülés







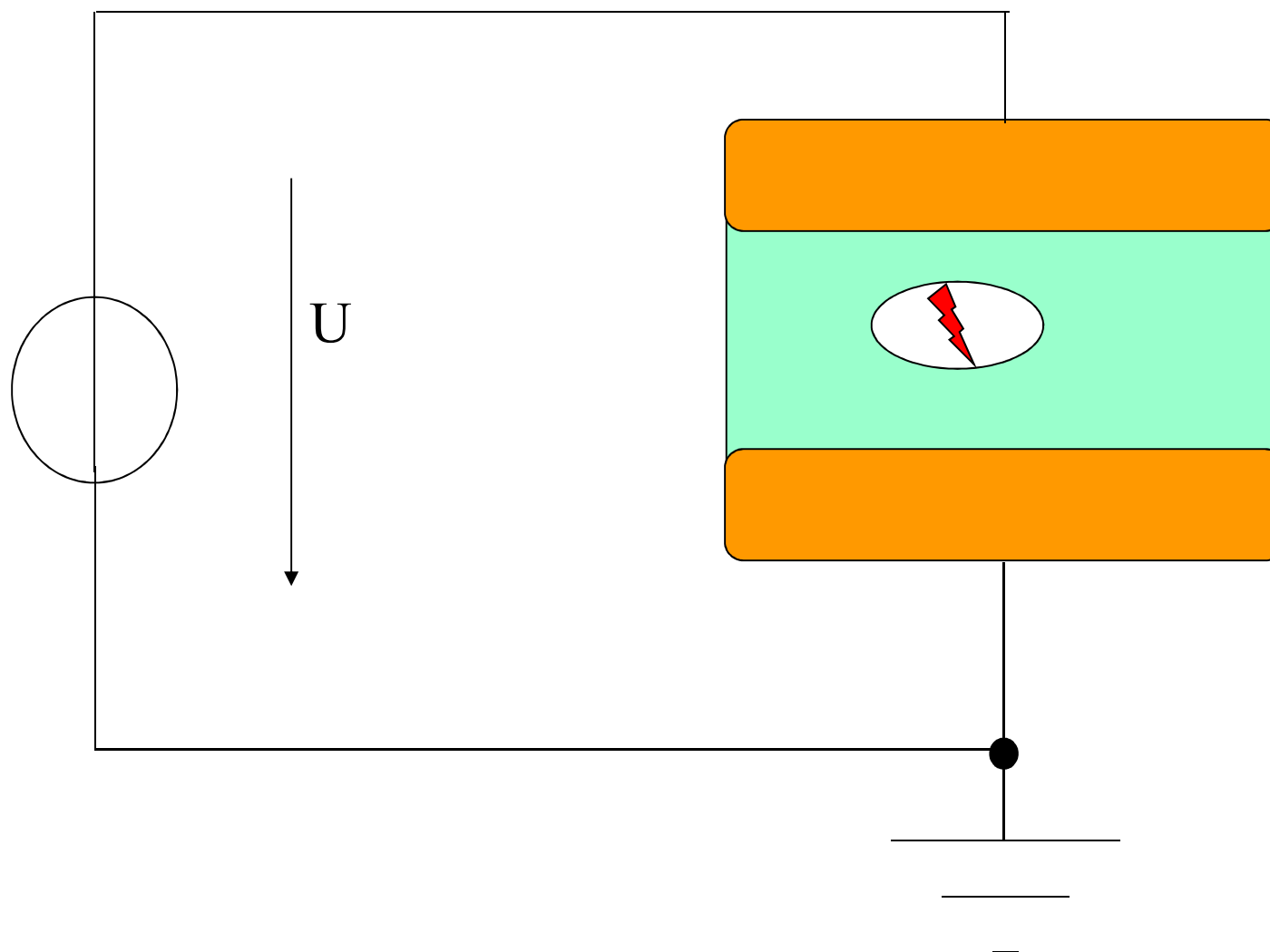




Treeing

Belső, vagy üregkisülés

Tápegység

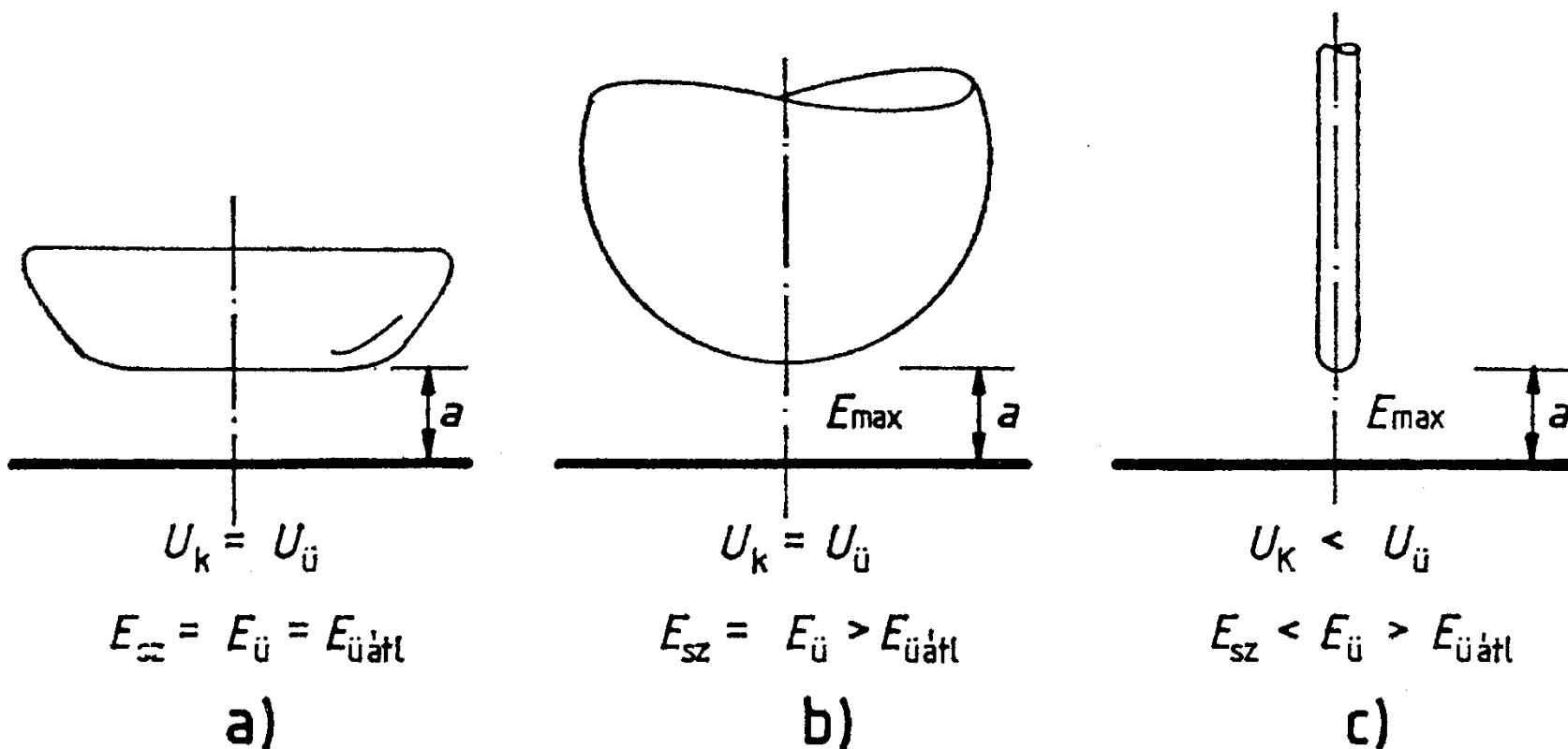




Villamos szél

A KÖRÜLMÉNYEK HATÁSA AZ ÁTÜTŐFESZÜLTSÉGRE

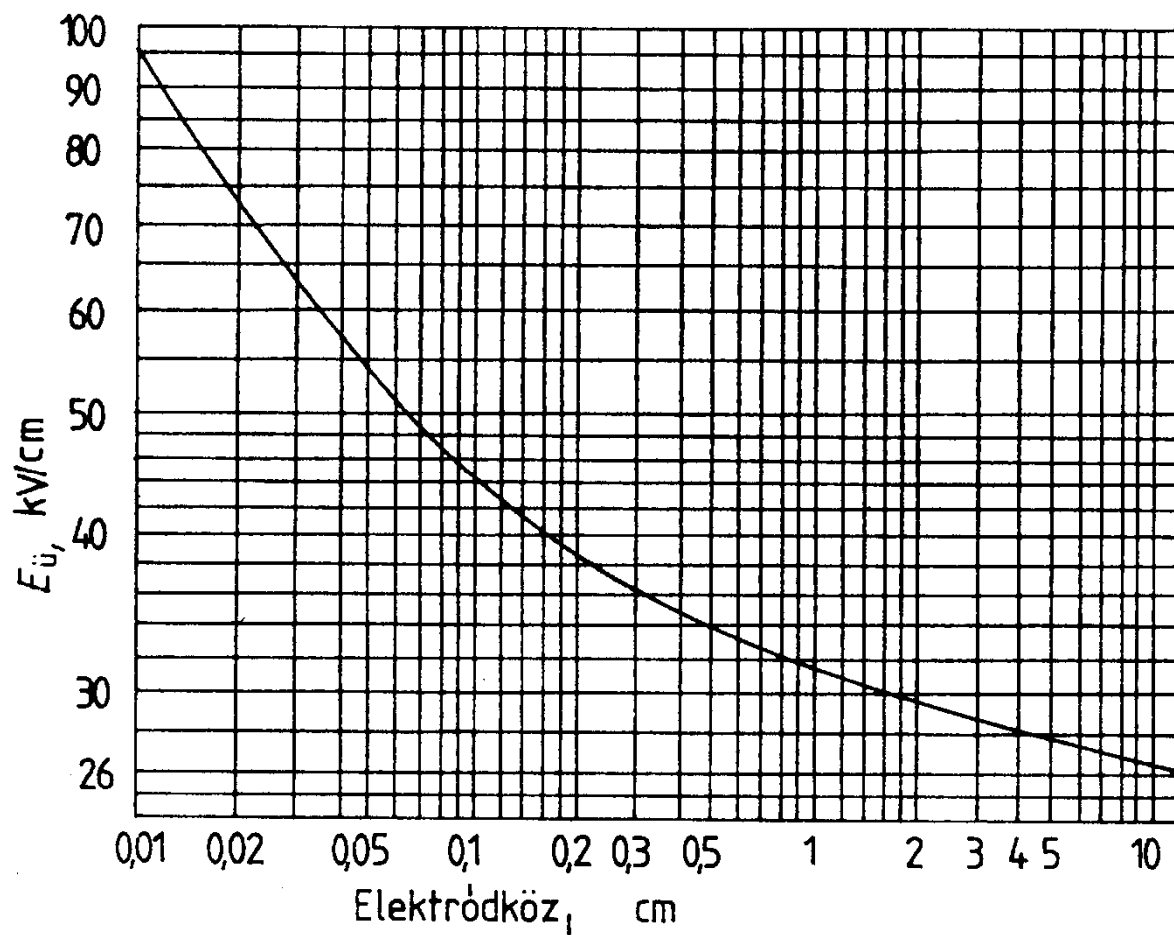
Az elektródok alakjának hatása



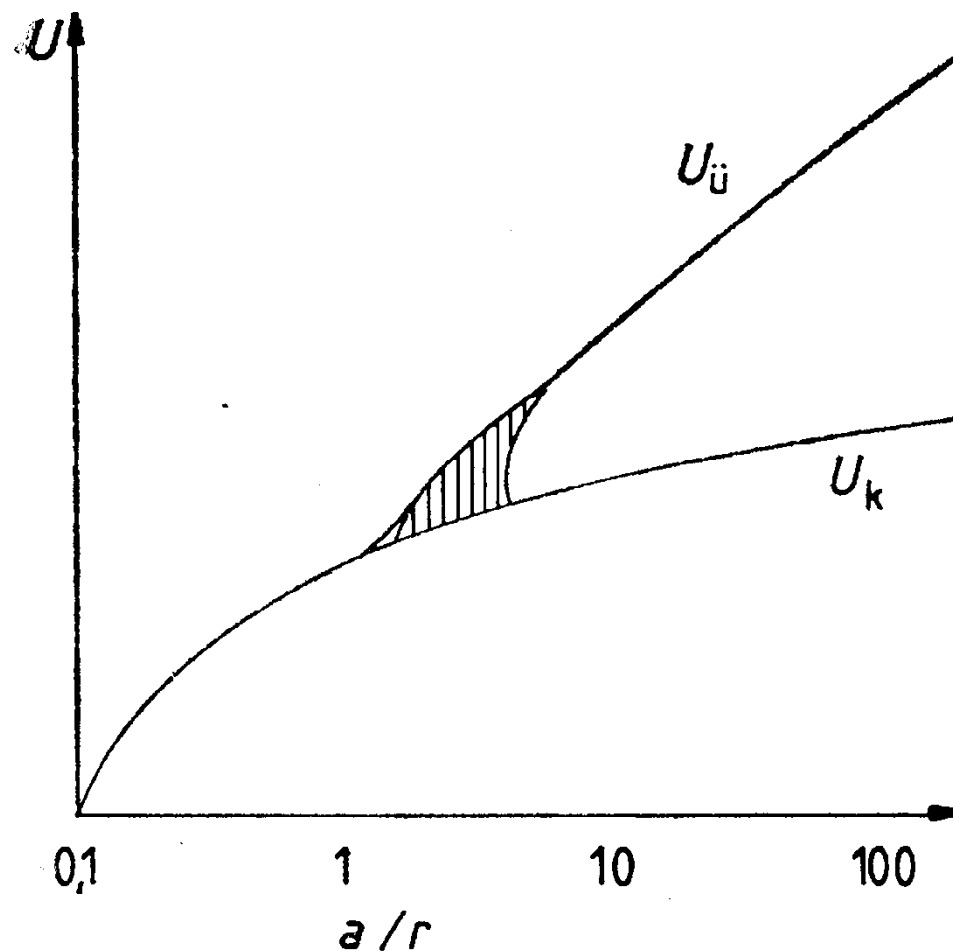
inhomogenitási tényező:

$$f = E_{\max} / E_{\text{átl}}$$

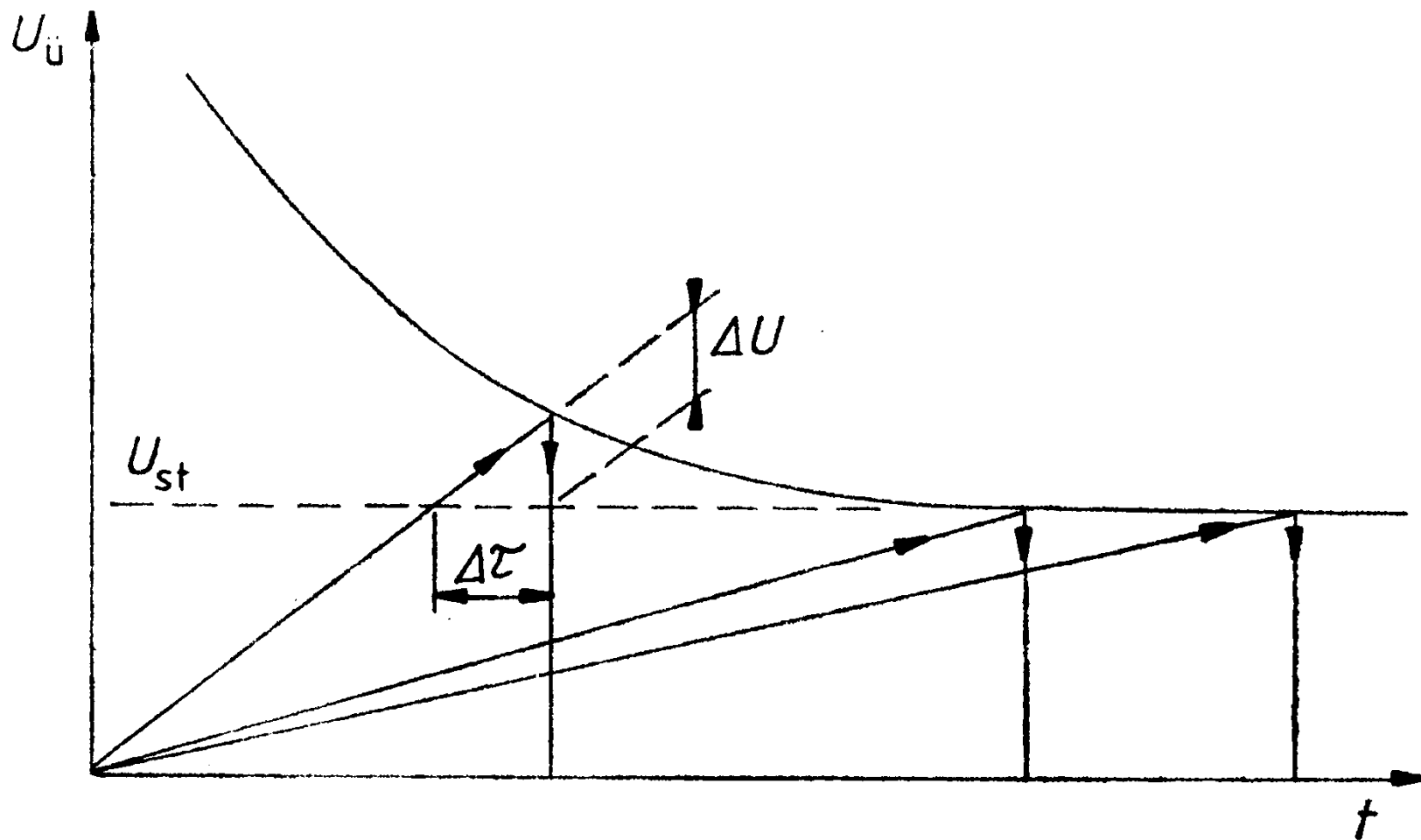
AZ ÁTÜTÉSI TÉRERŐSSÉG HOMOGÉN ERŐTÉRBEN



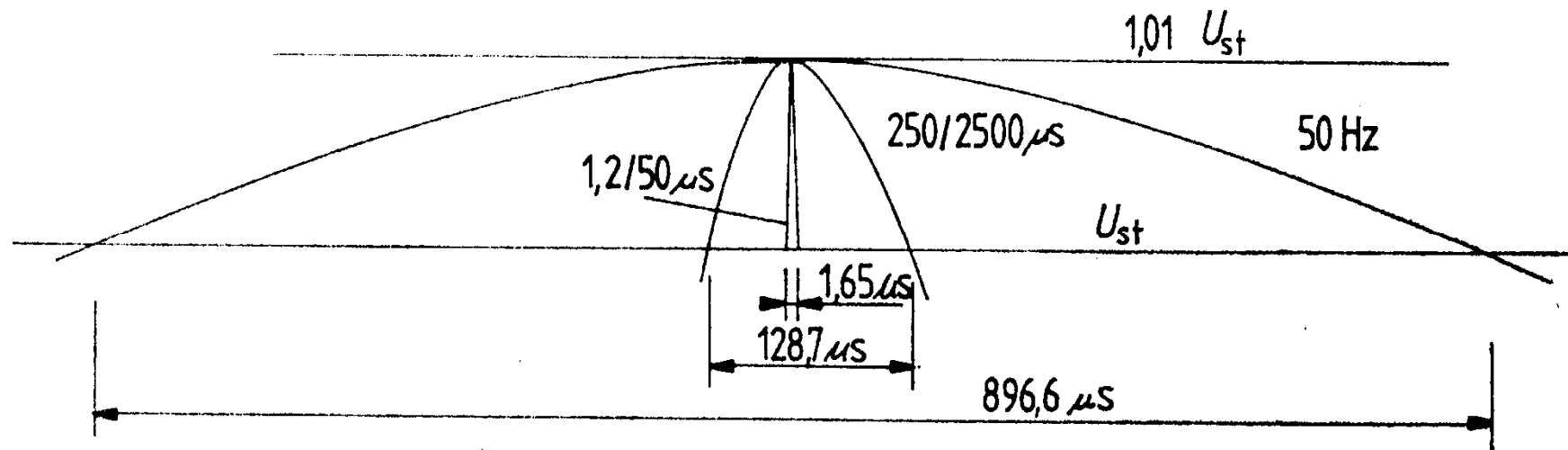
AZ ÁTÜTŐFESZÜLTÉG VÁLTOZÁSA ERŐSEN INHOMOGÉN ERŐTÉR BEN



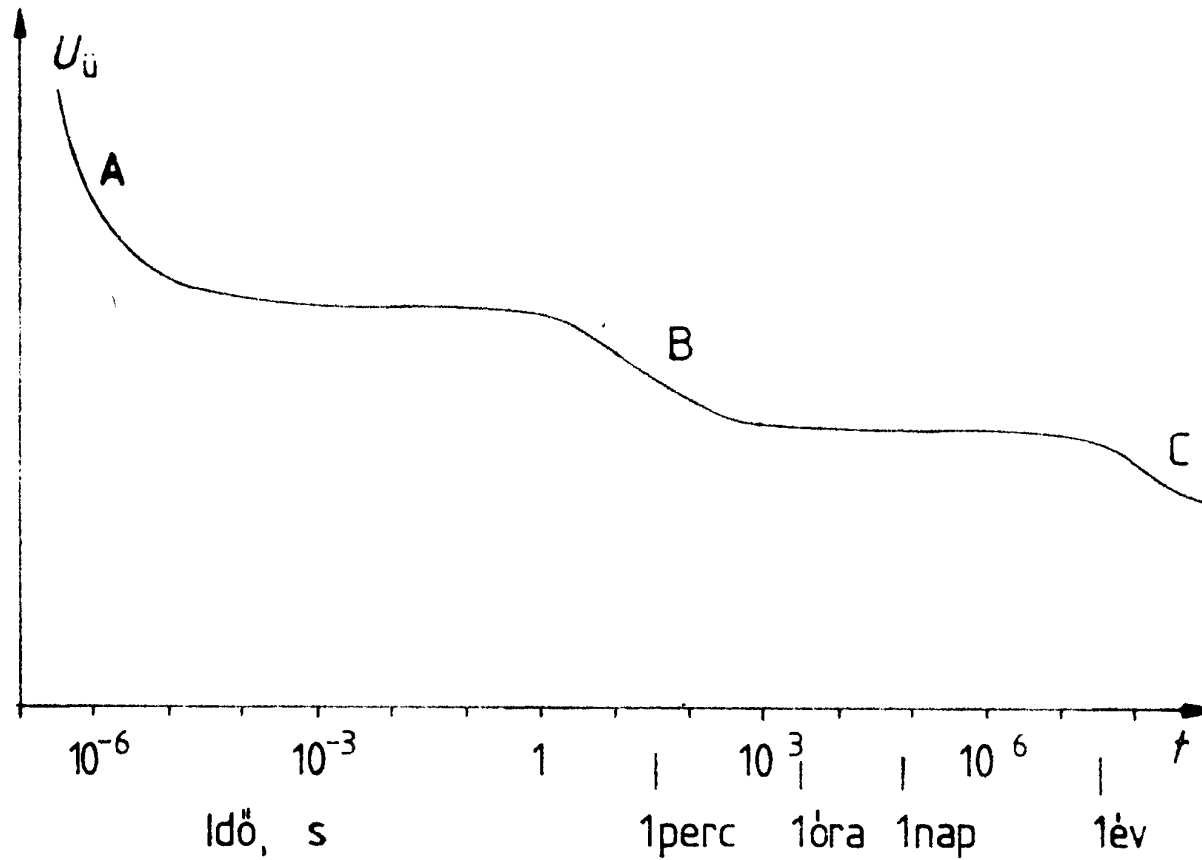
A FESZÜLTSGNÖVELÉS MEREDEKSÉGÉNEK HATÁSA



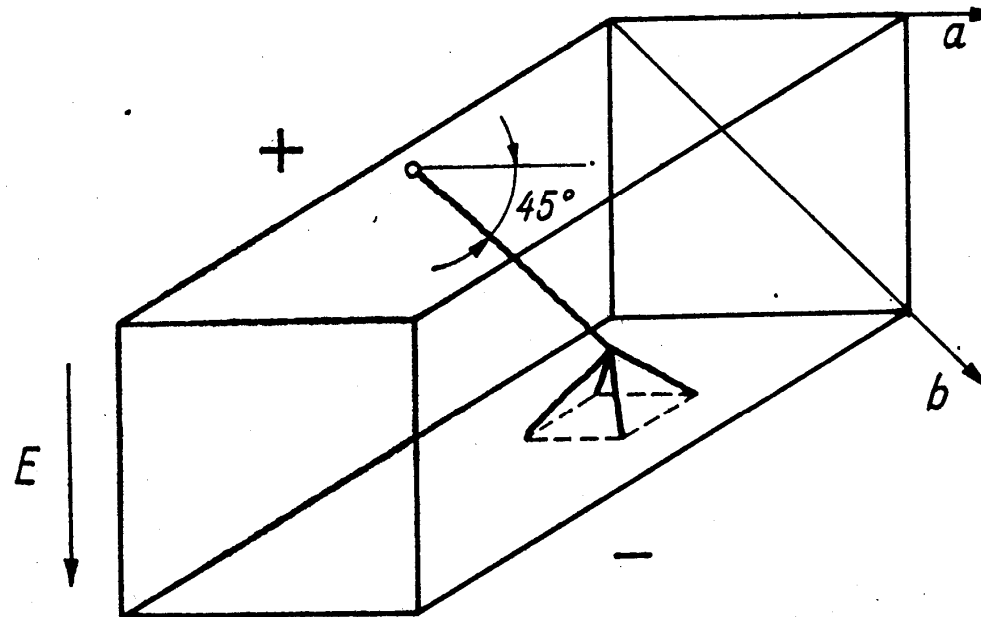
AZ IDŐ SZEREPE



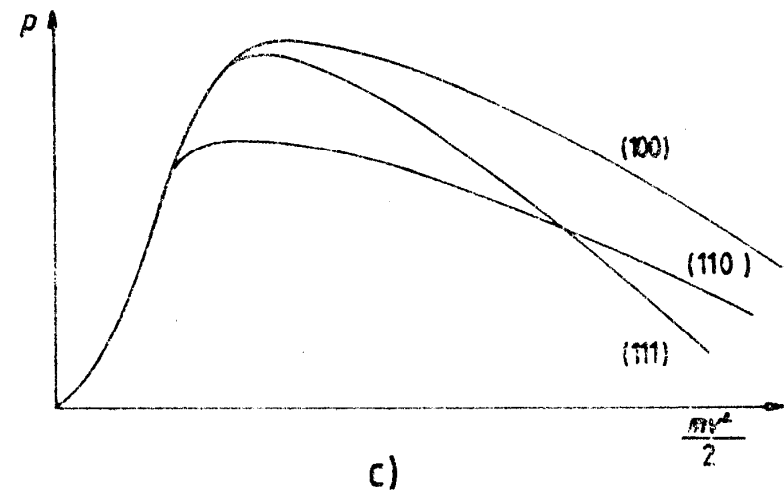
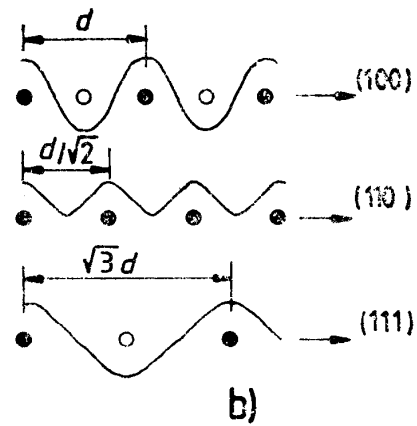
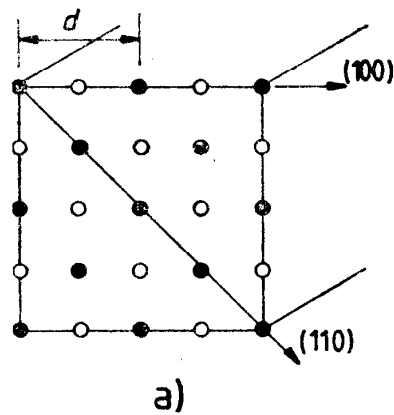
KISÜLÉSEK SZILÁRD SZIGETELŐANYAGOKBAN



TISZTÁN VILLAMOS ÁTÜTÉS KÖSÓKRISTÁLYBAN



AZ ELEKTRONOK ENERGIAVISZONYAI KÖSŐKRISTÁLYBAN

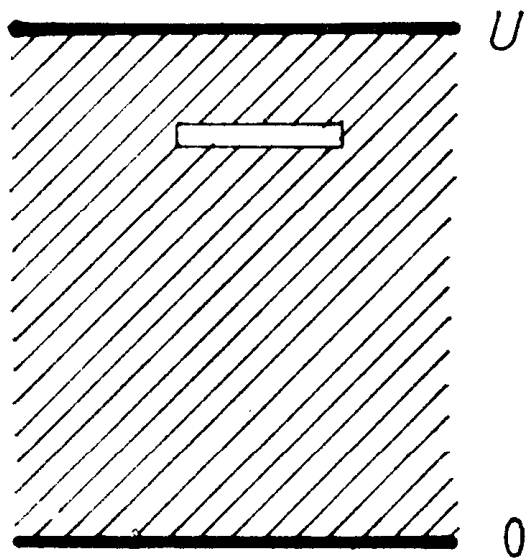


Lassú átütési folyamatok

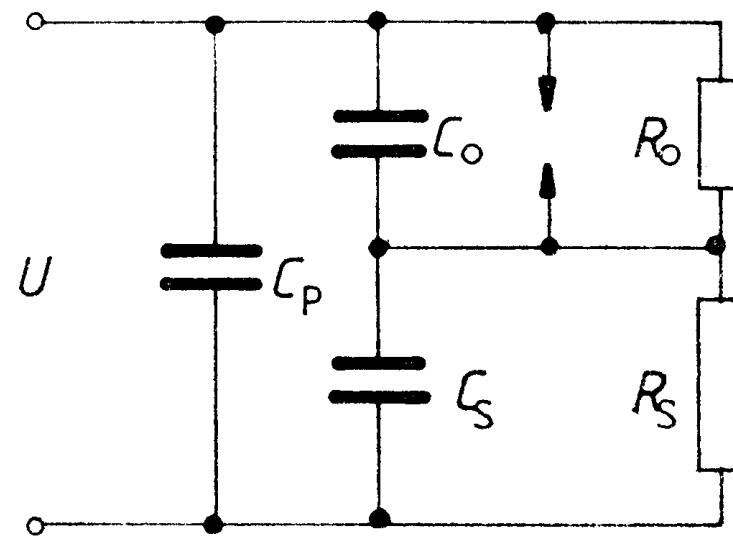
Részkisülés

Treeing

RÉSZKISÜLÉS BELSŐ ÜREGEKBEN

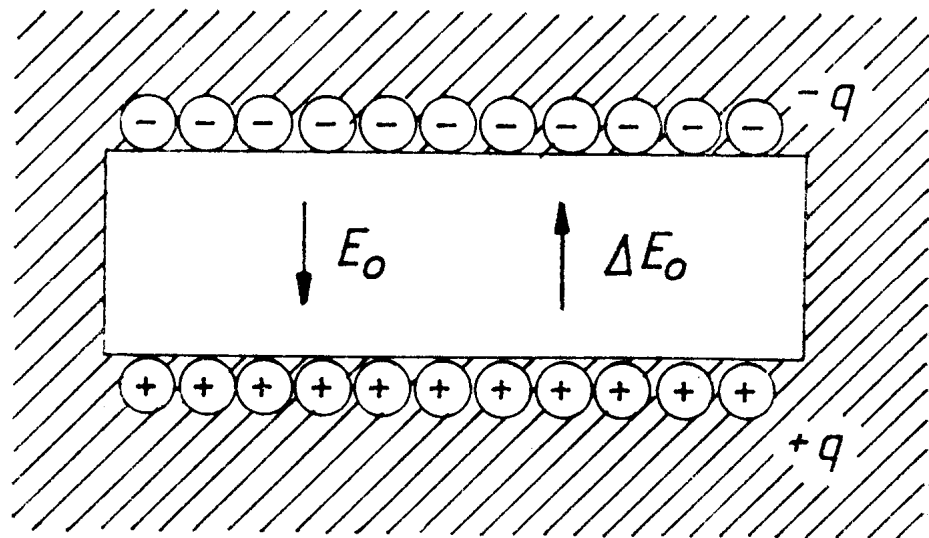


a)

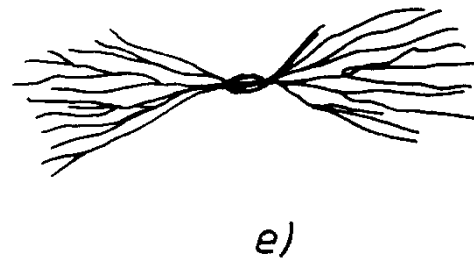
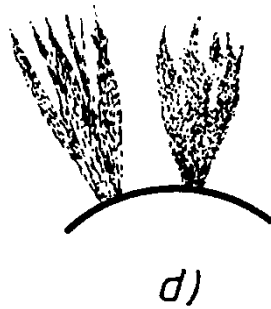
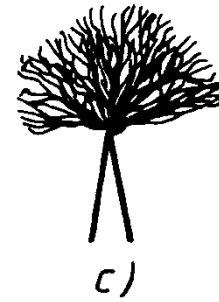
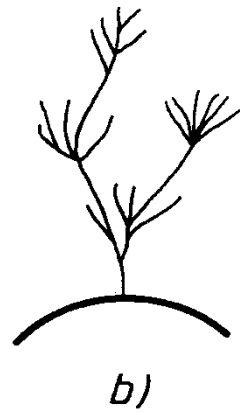
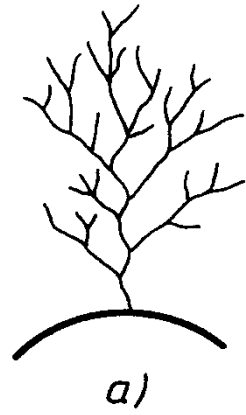


b)

RÉSZKISÜLÉS SORÁN AZ ÜREG FALÁN KIALAKULÓ TÖLTÉSEK

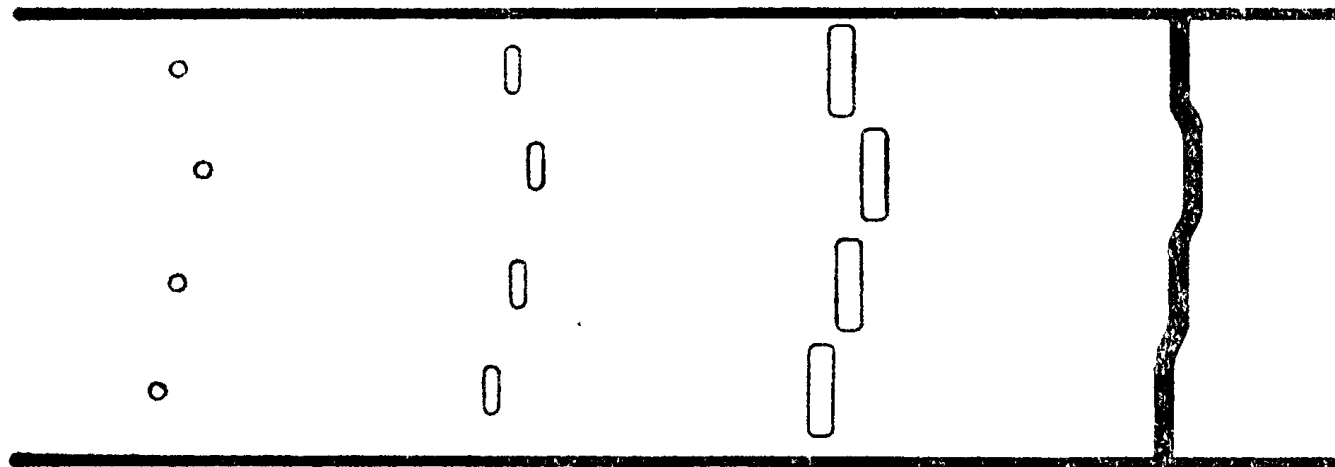


TREEING

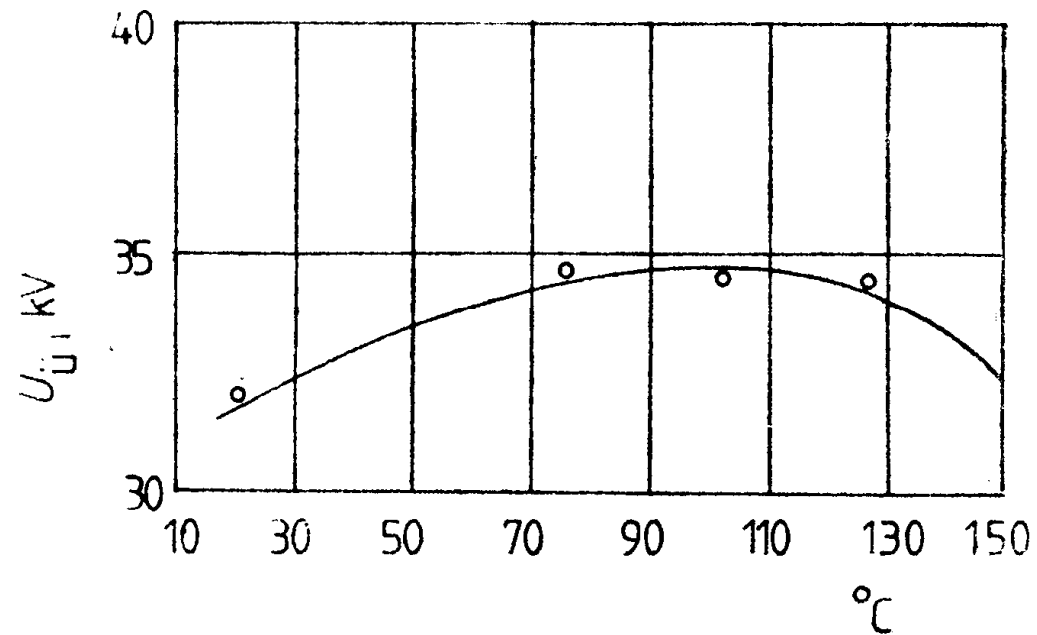


KISÜLÉSEK FOLYADÉKOKBAN

Gázcsatorna elmélet

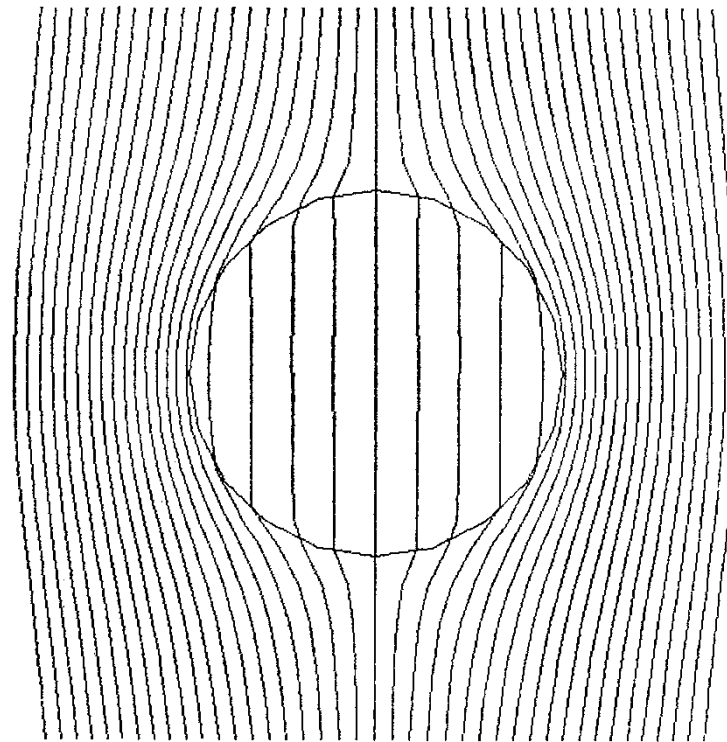


TRANSZFORMÁTOROLAJ ÁTÜTŐFESZÜLTSGÉNEK VÁLTOZÁSA A HŐMÉRSÉKLET FÜGGVÉNYÉBEN

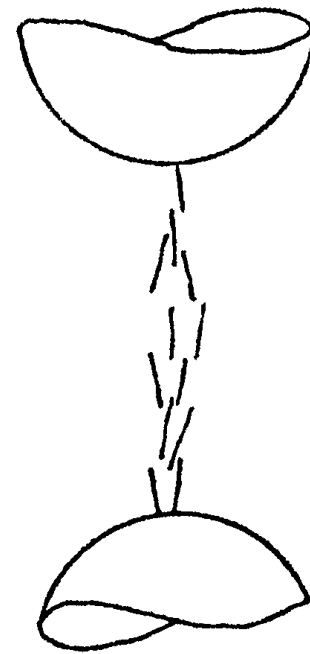
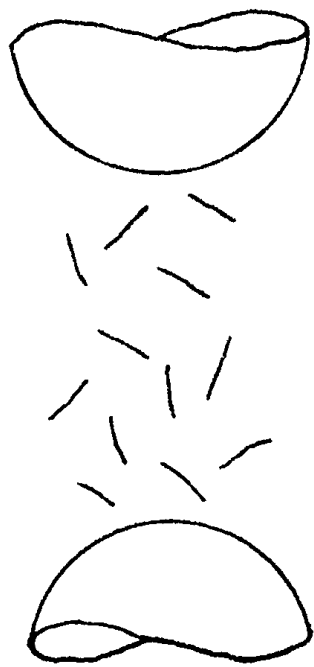


$f = 60 \text{ Hz}$

FOLYADÉKOK ÁTÜTÉSE VÍZ SZENNYEZÉS ESETÉN



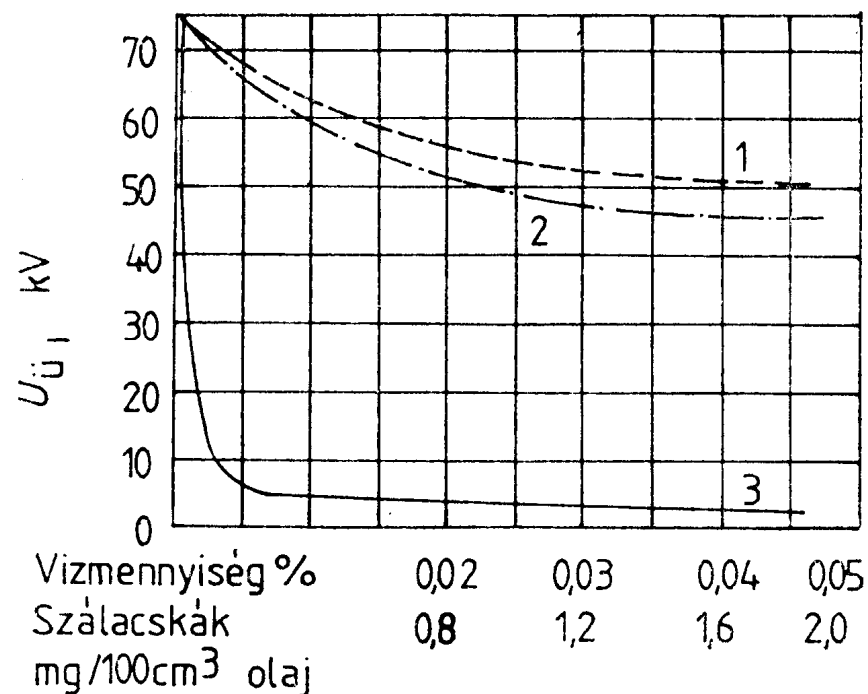
FOLYADÉKOK ÁTÜTÉSE SZILÁRD SZENNYEZÉS ESETÉN



TRANSZFORMÁTOROLAJ

ÁTÜTŐFESZÜLTSGÉNEK VÁLTOZÁSA

A SZENNYEZÉS FÜGGVÉNYÉBEN



1: csak nedvesség

2: csak száraz szálak

3: nedvesség és szálak együtt

$f = 50 \text{ Hz}$

**KÖSZÖNÖM
A
FIGYELMET!**

VIVEMA13

Váltakozó áramú rendszerek 3

(3+0+0 f 4k)

2016

készítette

Dr BERTA István egyetemi tanár és

Dr SZEDENIK Norbert egyetemi docens

Dr HORVÁTH Tibor professzor emeritusz és

Dr NÉMETH Endre egyetemi docens

könyvei és előadásai felhasználásával

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamos Energetika Tanszék

Nagyfeszültségű Technika és Berendezések Csoport

NF – 0 – 1 – 2 – 3

- 0 Az áramok háborúja (múlt – jelen – jövő)**
- 1 A villamos erőterek jellemzői. Energia és erőhatások villamos erőterekben. Feszültségeloszlás szigetelőkön. A váltakozó villamos terek analitikus és numerikus számítása.**
- 2 Villamos szigetelőanyagok változó erőterben. Vezetés és polarizáció, polarizáció spektrum. Szigetelésre kapcsolt váltakozó feszültség, vektorábrák, rétegezett szigetelések. A szigetelők villamos anyagjellemzői, azok frekvencia- és hőmérsékletfüggése. Villamos veszteségek (veszteségi tényező, dielektromos veszteségek).**
- 3 Váltakozó villamos erőterek előállítása és mérése. Kábelek és távvezetékek erőtere. Váltakozó feszültségű szigetelésvizsgálat. Feszültség-igénybevételek, próbafeszültségek.**

Nagyfeszültségű méréstechnika

MÉRENDŐ MENNYISÉGEK

- Elrendezésre jellemző:
 - villamos térerősség,
 - feszültség,
 - kapacitás,
 - töltés,
 - levezetési ellenállás,
 - kisülési áram.

MÉRENDŐ MENNYISÉGEK

- Az anyagra jellemző:
 - Fajlagos térfogati ellenállás.
 - Fajlagos felületi ellenállás.
- Befolyásoló tényezők:
 - hőmérséklet,
 - relatív páratartalom.
- Relatív permittivitás.

Nagyfeszültség előállítása

A VIZSGÁLÓFESZÜLTSEGEK FAJTÁI

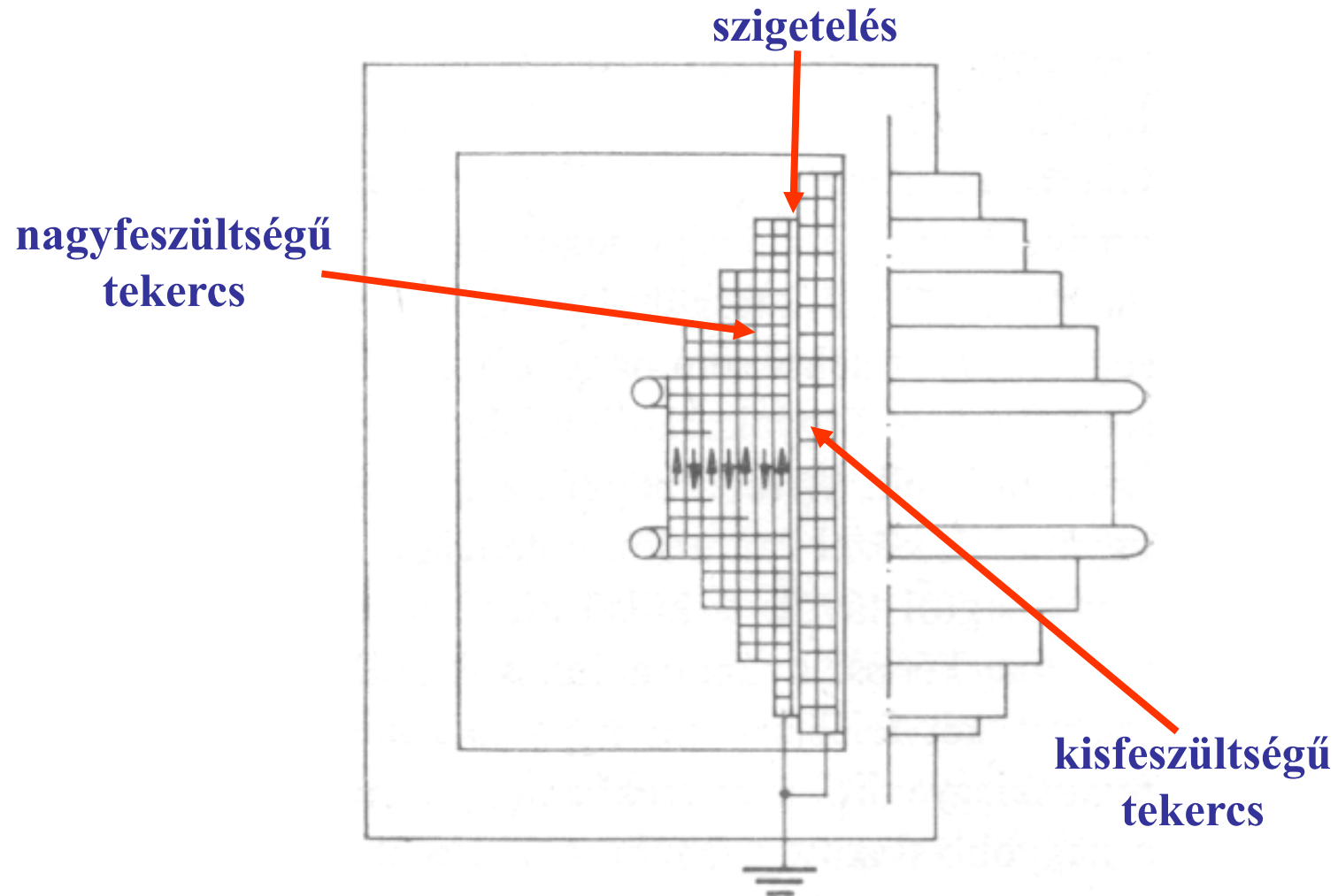
- **váltakozó feszültség,**
- **egyenfeszültség,**
- **aperiodikus feszültség hullám,**
- **nagyfrekvenciás, csillapodó feszültség hullám.**

Ipari frekvenciájú váltakozófeszültség előállítása

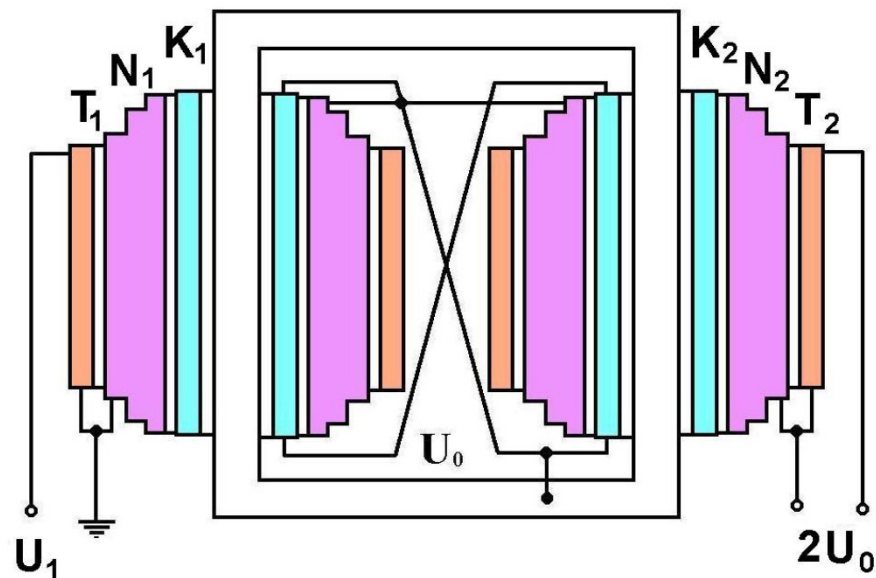
Próbatranszformátorok



Lépcsős felépítésű nagyfeszültségű tekercselés, áramirányok feltüntetésével



Próbatranszformátorok



T_1, T_2 : tápláló tekercs

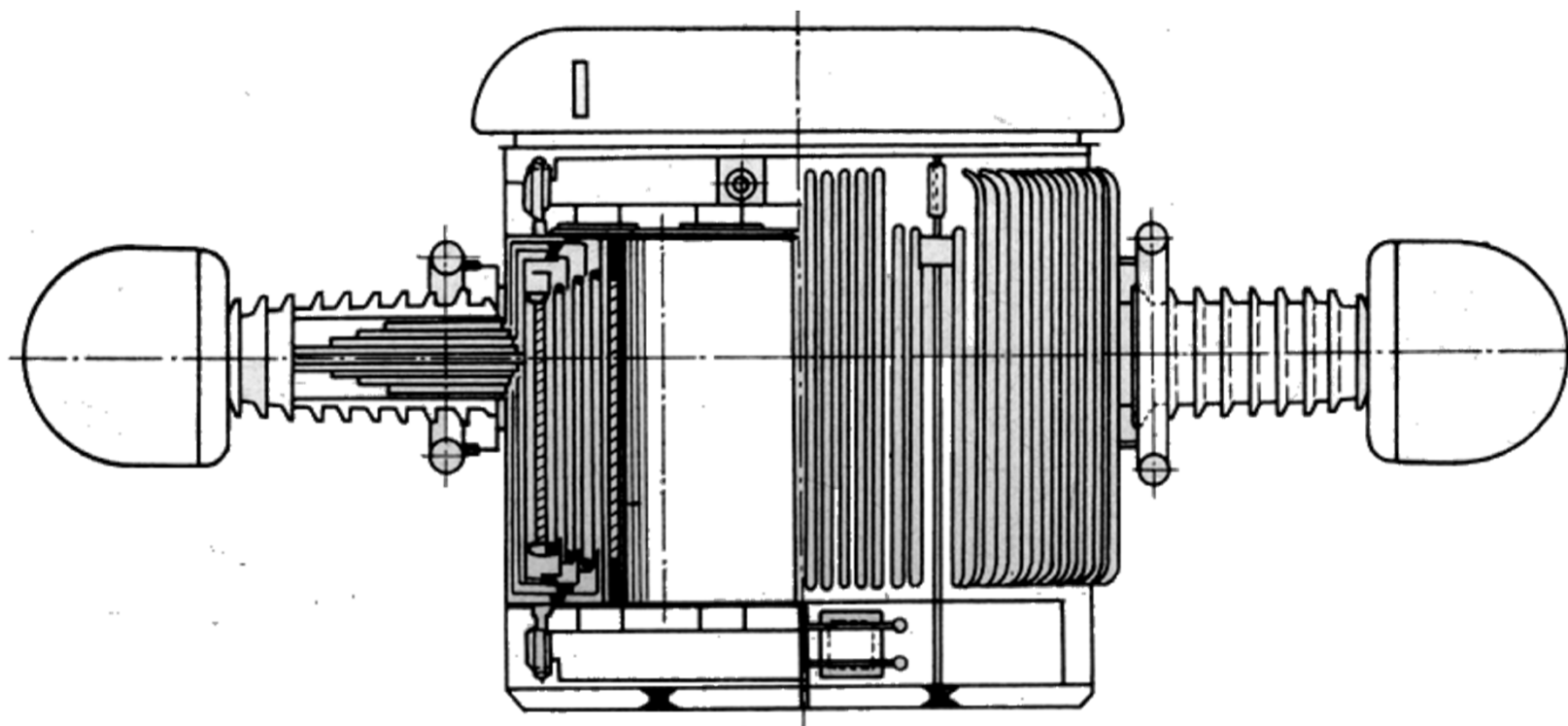
N_1, N_2 : nagyfeszültségű tekercs

K_1, K_2 : kiegyenlítő tekercs

A vasmagot el kell szigetelni a föld potenciáltól!!!

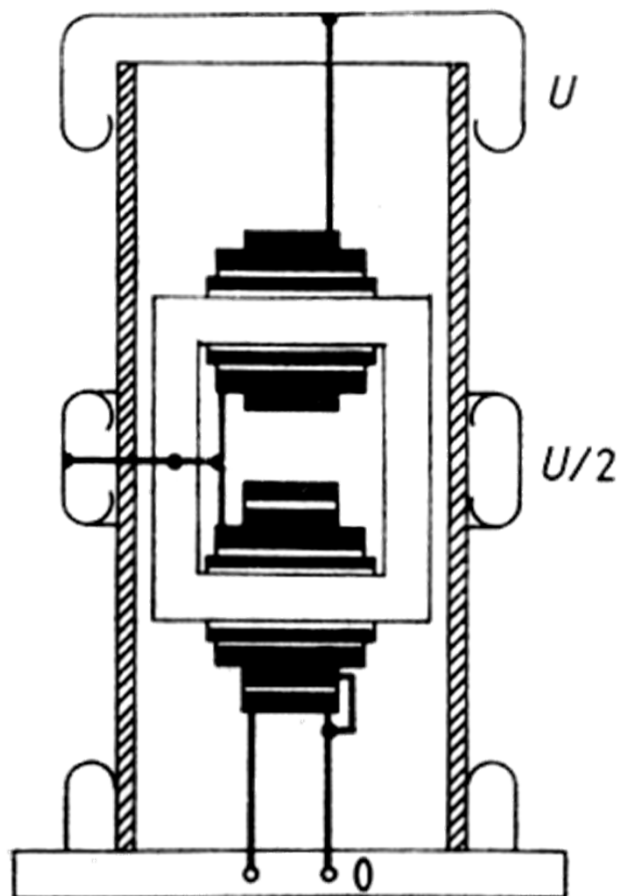
Ipari frekvenciájú váltakozófeszültség előállítása

Szigetelés igénybevételének megosztása két félre osztott tekercssel és félfeszültségen lévő vasmaggal:



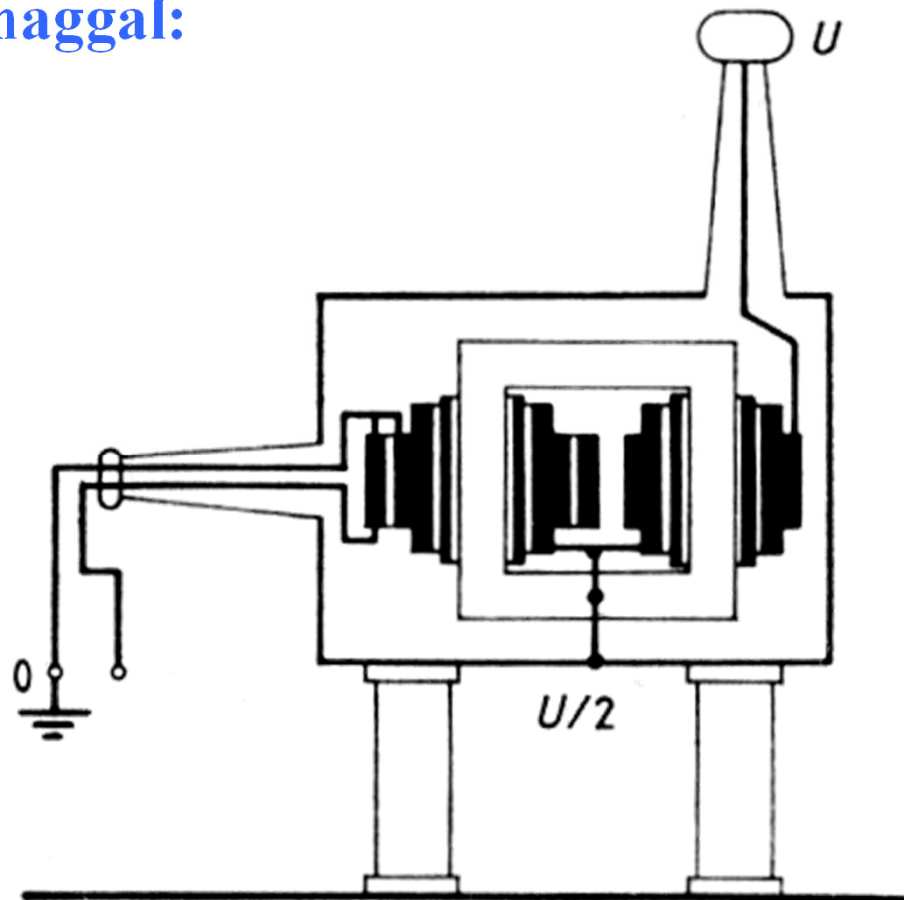
Ipari frekvenciájú váltakozófeszültség előállítása

Szigetelő házba épített olajszigetelésű transzformátor:



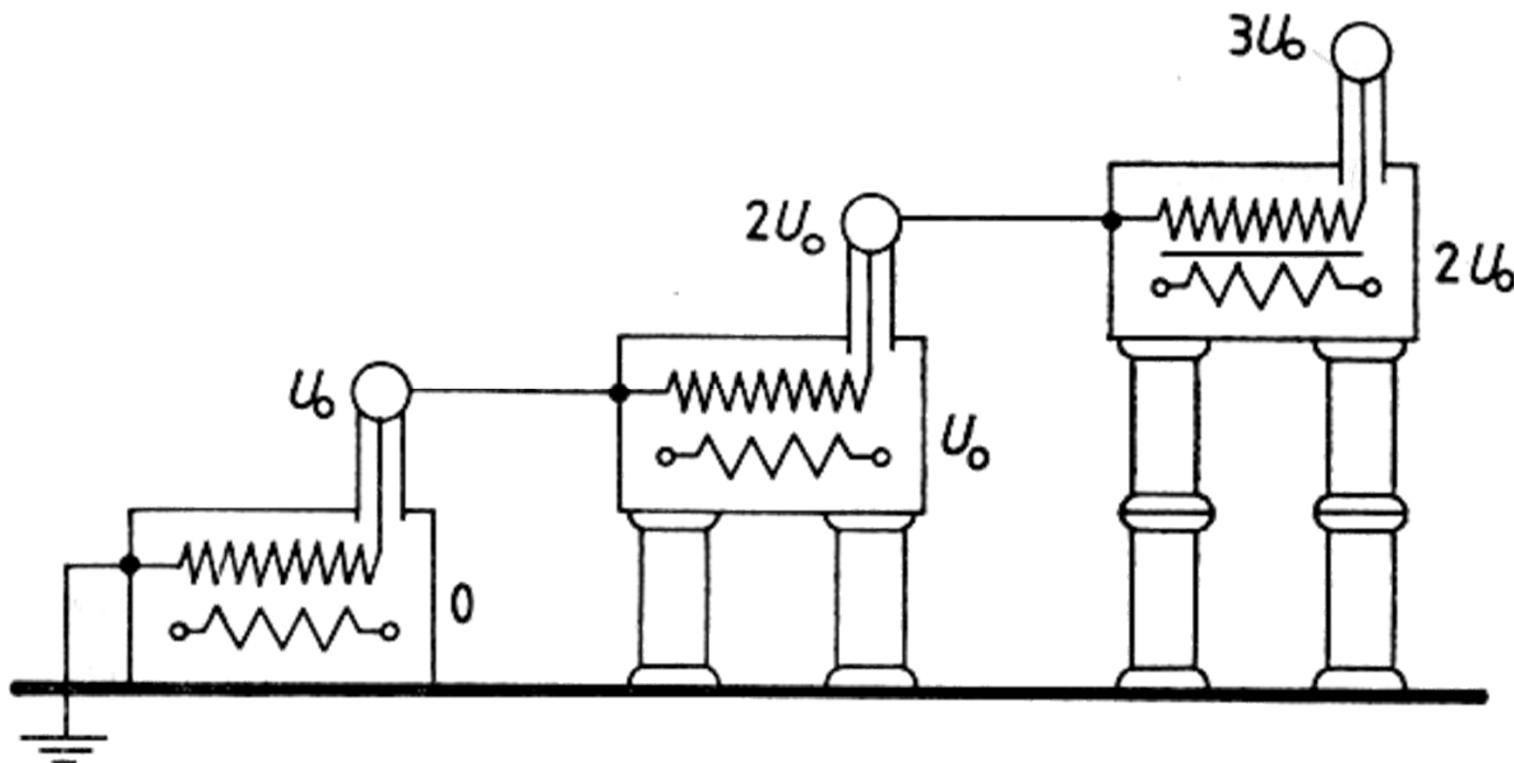
Ipari frekvenciájú váltakozófeszültség előállítása

Osztott tekercsű próbatranszformátor a földtől szigetelt házzal és vasmaggal:



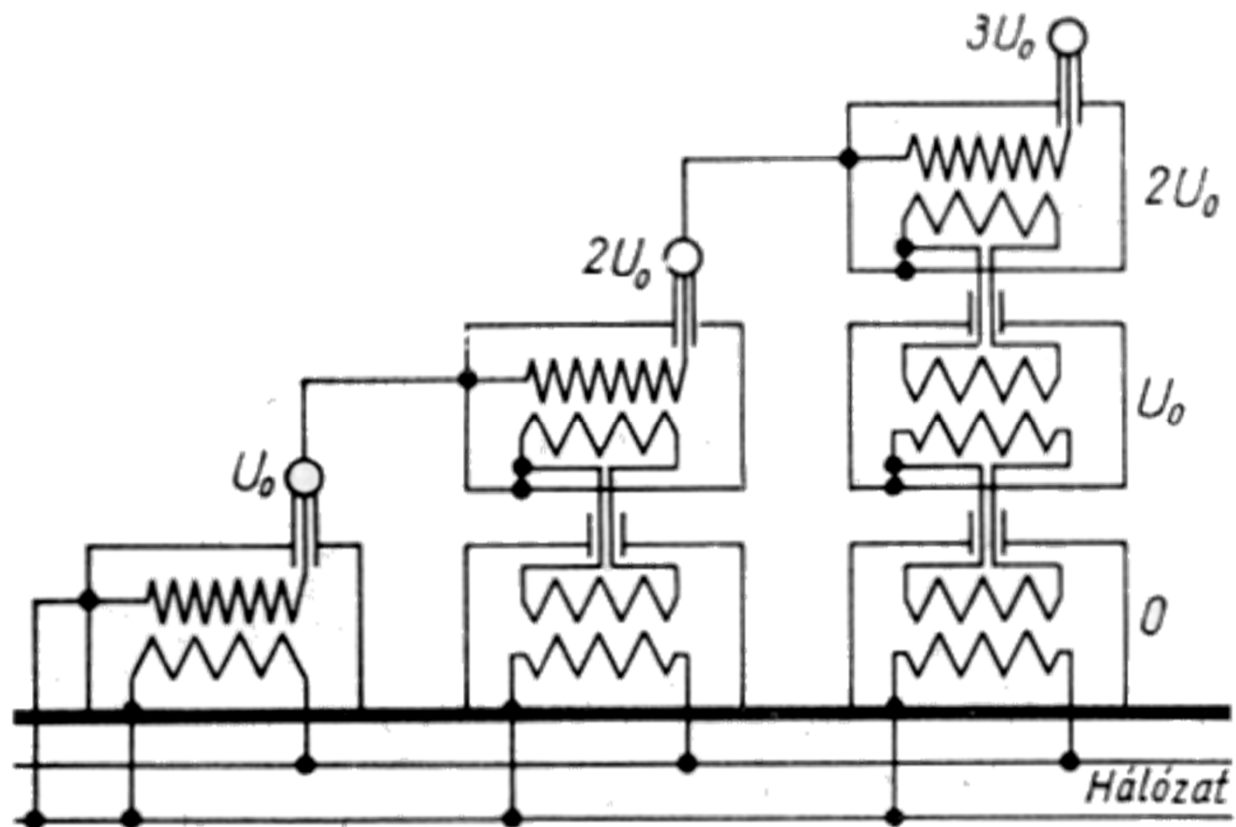
Ipari frekvenciájú váltakozófeszültség előállítása

Lépcsős transzformátorok:



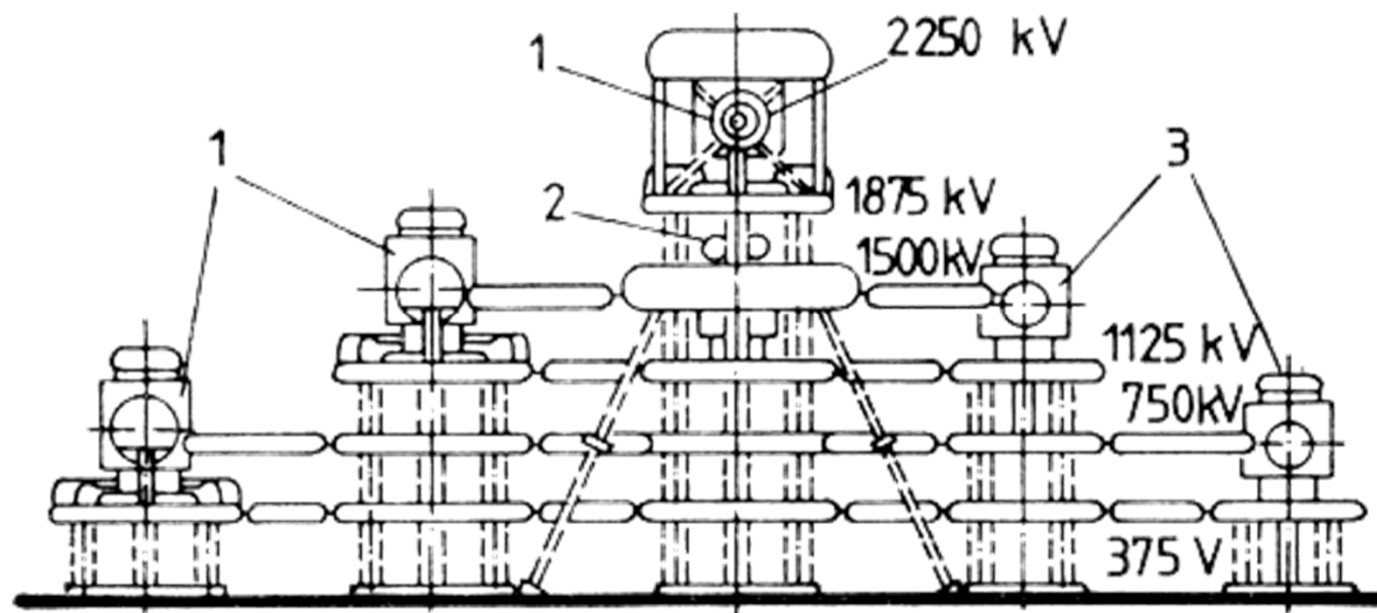
Ipari frekvenciájú váltakozófeszültség előállítása

Dessauer-féle lépcsős transzformátor kapcsolása:



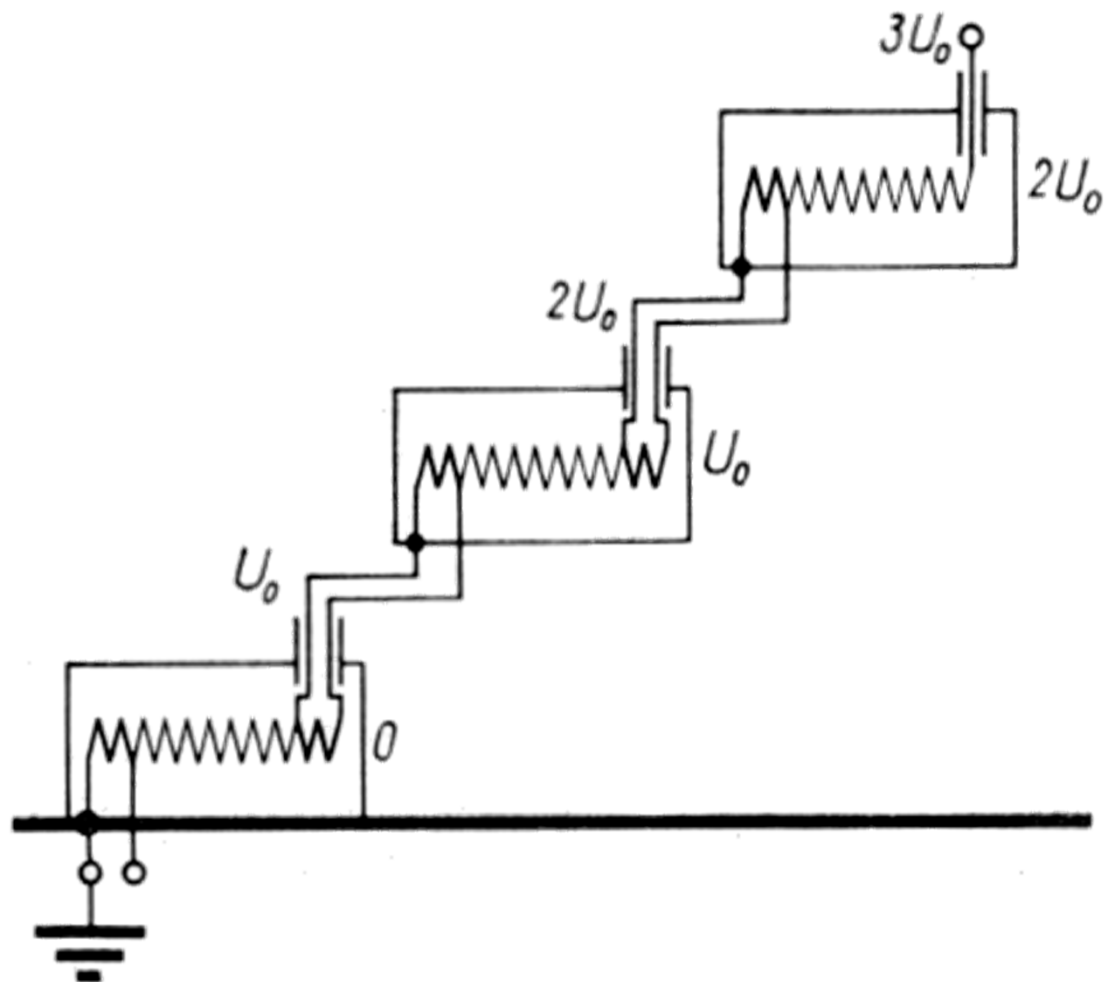
Ipari frekvenciájú váltakozófeszültség előállítása

Dessauer-rendszerű 3x750 kV-os próbatranszformátor:



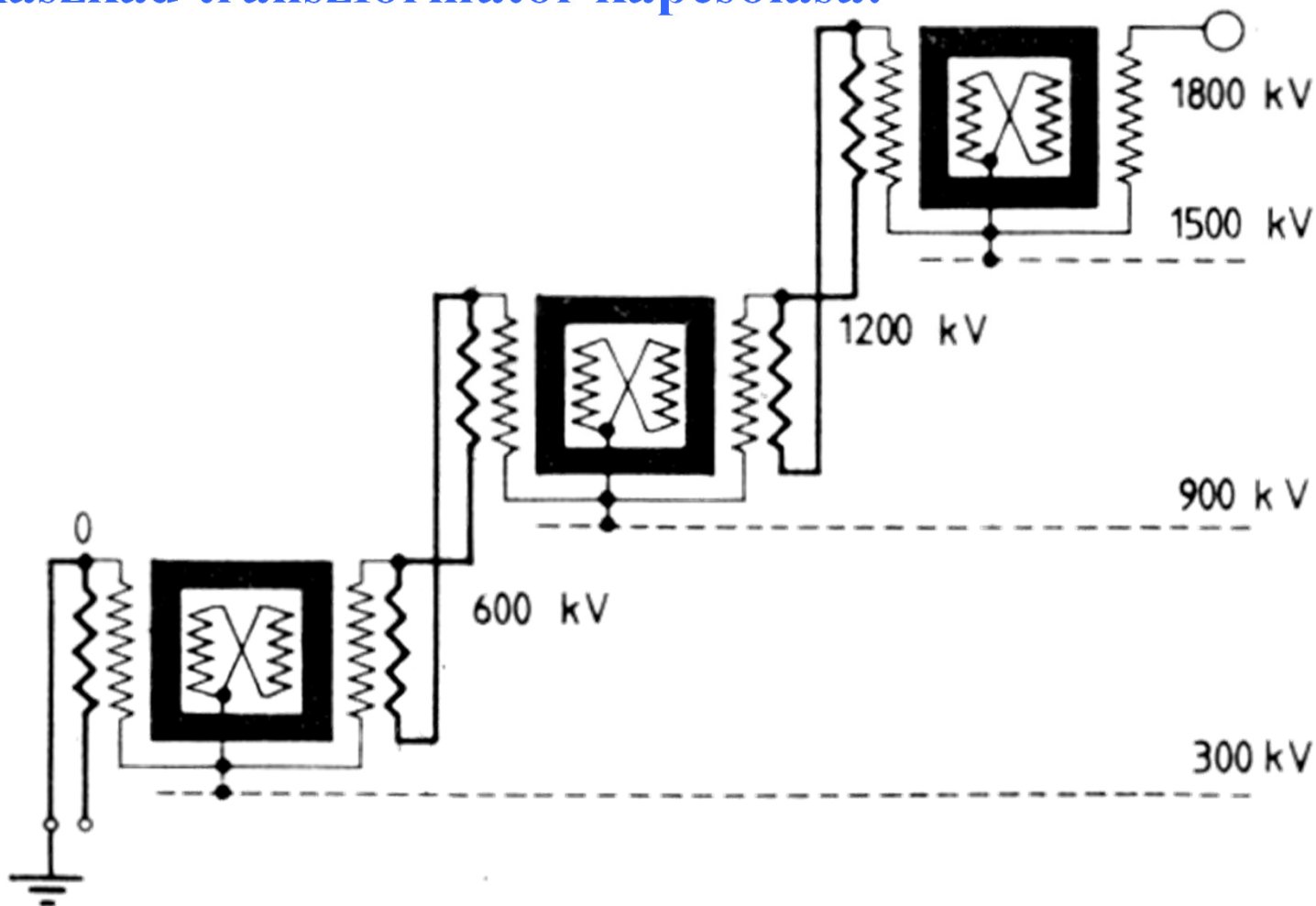
Ipari frekvenciájú váltakozófeszültség előállítása

Az autotranszformátoros transzformátor táplálás kapcsolása:



Ipari frekvenciájú váltakozófeszültség előállítása

Kaskád transzformátor kapcsolása:



Ipari frekvenciájú váltakozófeszültség előállítása

A próbatranszformátor táplálása:

Kis teljesítmény esetén:

- ellenállásos feszültségosztó vagy
- toroidtranszformátor;

nagyobb teljesítményre:

- szinkron generátor,
- indukciós szabályzó vagy
- fluxusáttereléssel működő feszültségszabályzó transzformátor.

Ipari frekvenciájú váltakozófeszültség előállítása

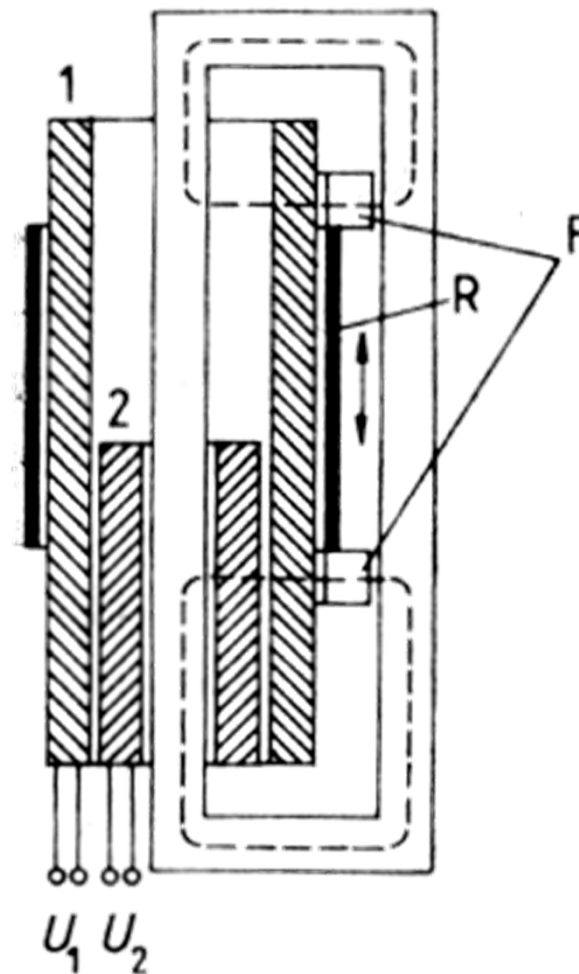
Feszültségszabályozó transzformátor rövidrezárt tolótekerccsel:

1. kétszeres menetszámú primer
tekercs;

2. egyszeres menetszámú szekunder
tekercs;

R rövidrezárt mozgó tekercs;

F mágneses fluxus



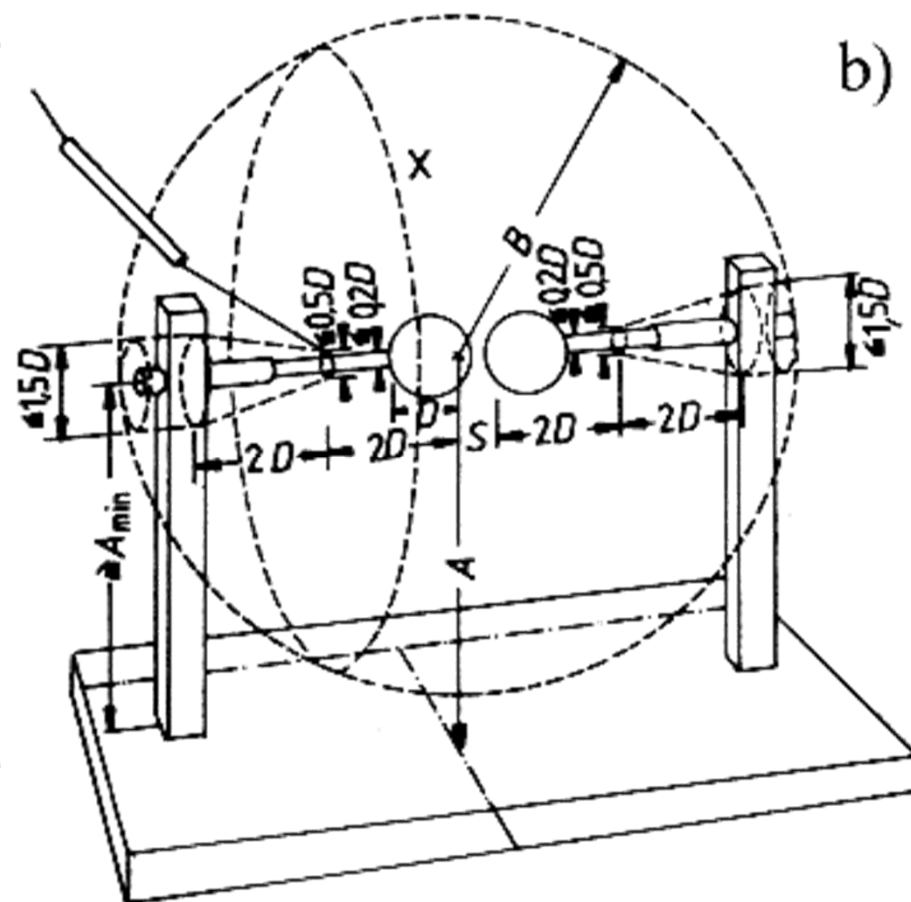
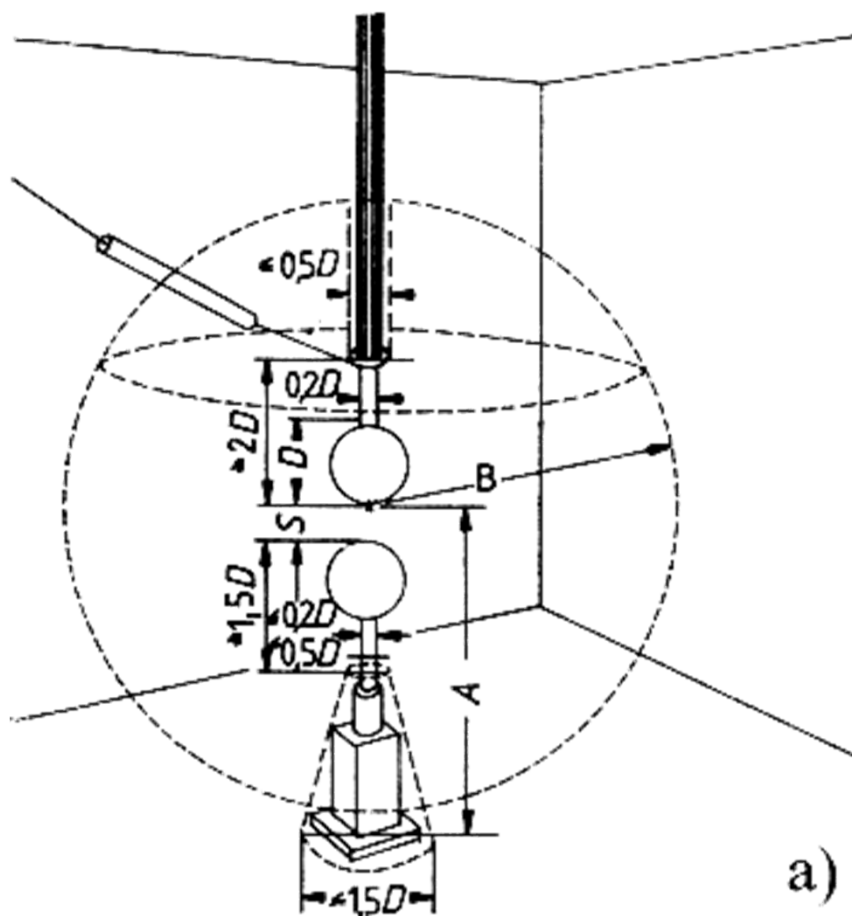
Nagyfeszültség mérése

A feszültség csúcsértékének mérése

Gömbszikraközök előírt méretei és az idegen tárgyak megközelítésének legkisebb B távolsága:

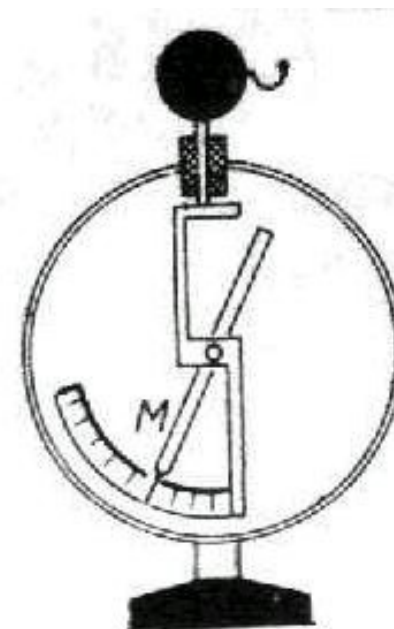
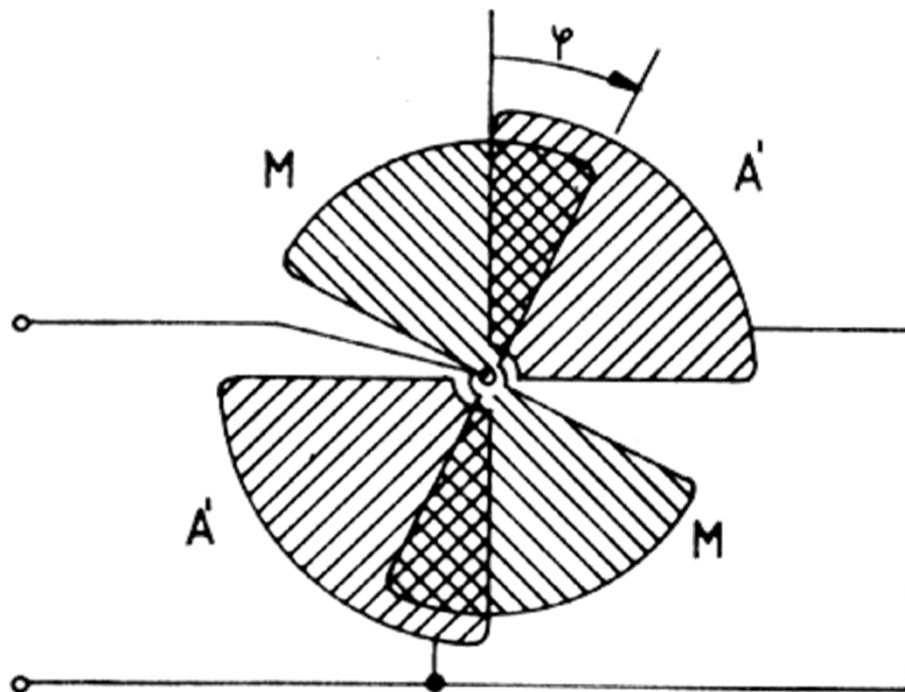
a) aszimmetrikus;

b) szimmetrikus elrendezésű szikraköz



A feszültség középértékének mérése

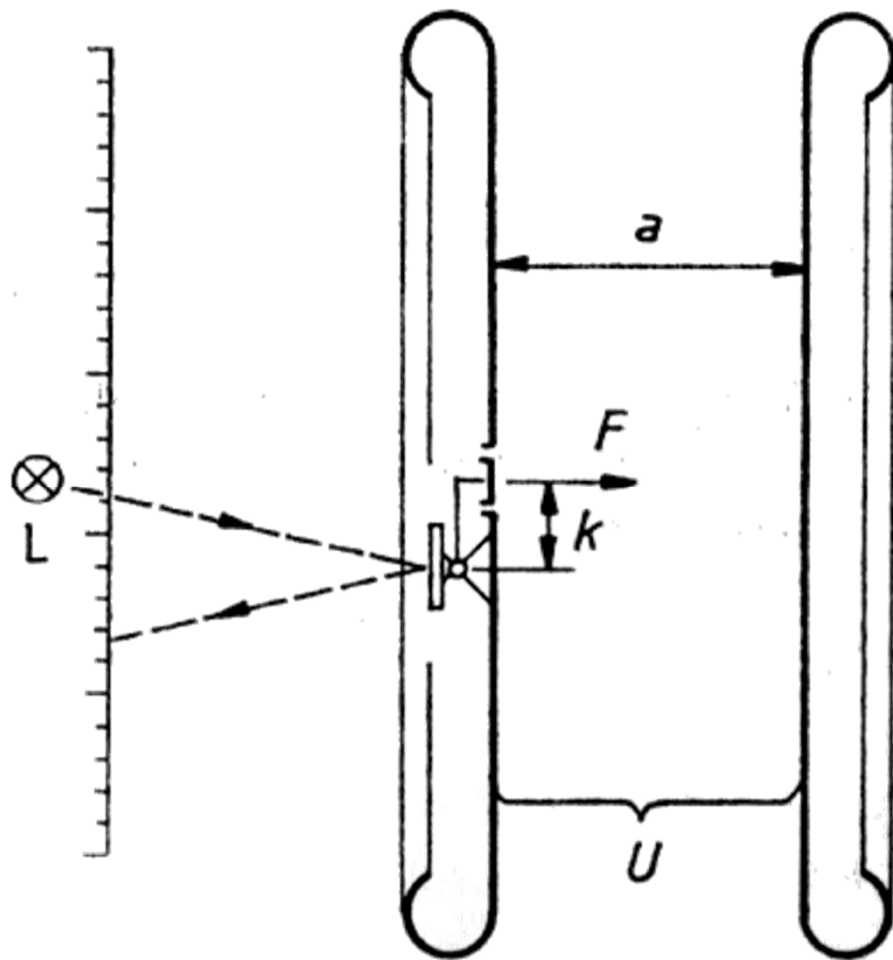
Elektrosztatikus voltmérő álló és mozgó elektródjai:



$$M = \frac{dW}{d\varphi} = \frac{1}{2} \frac{dC}{d\varphi} U^2 \approx AU^2$$

A feszültség középértékének mérése

Starke-Schröder rendszerű elektrosztatikus voltmérő:



$$F = \frac{dW}{da}$$

$$F = \frac{1}{2} \frac{dC}{da} U^2 = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon A}{a^2} U^2$$

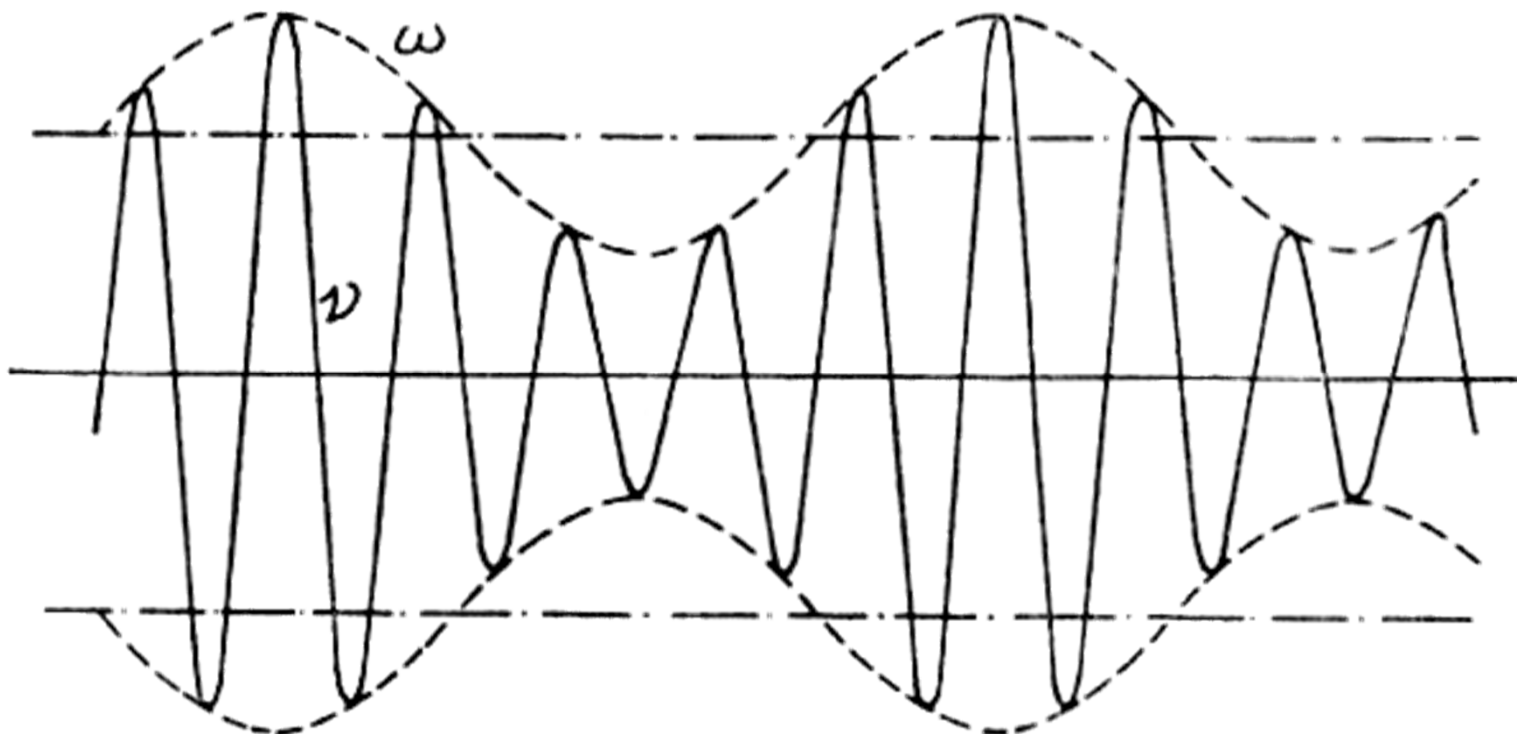


Generátor-elven működő voltmérők

$$i_c = \frac{dQ}{dt} = C(t) \frac{dU}{dt} + U(t) \frac{dC}{dt}$$

Generátor-elven működő voltmérők

Áramhullám:

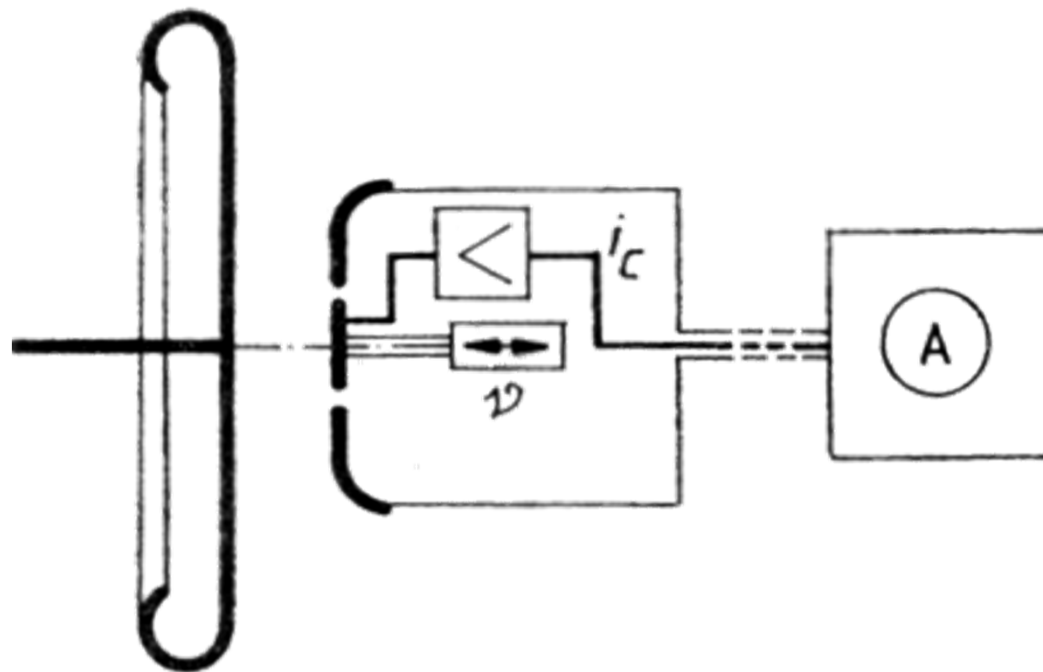


ω : a mérendő feszültség körfrekvenciája

ν : a kapacitás változásának körfrekvenciája

Generátor-elven működő voltmérők

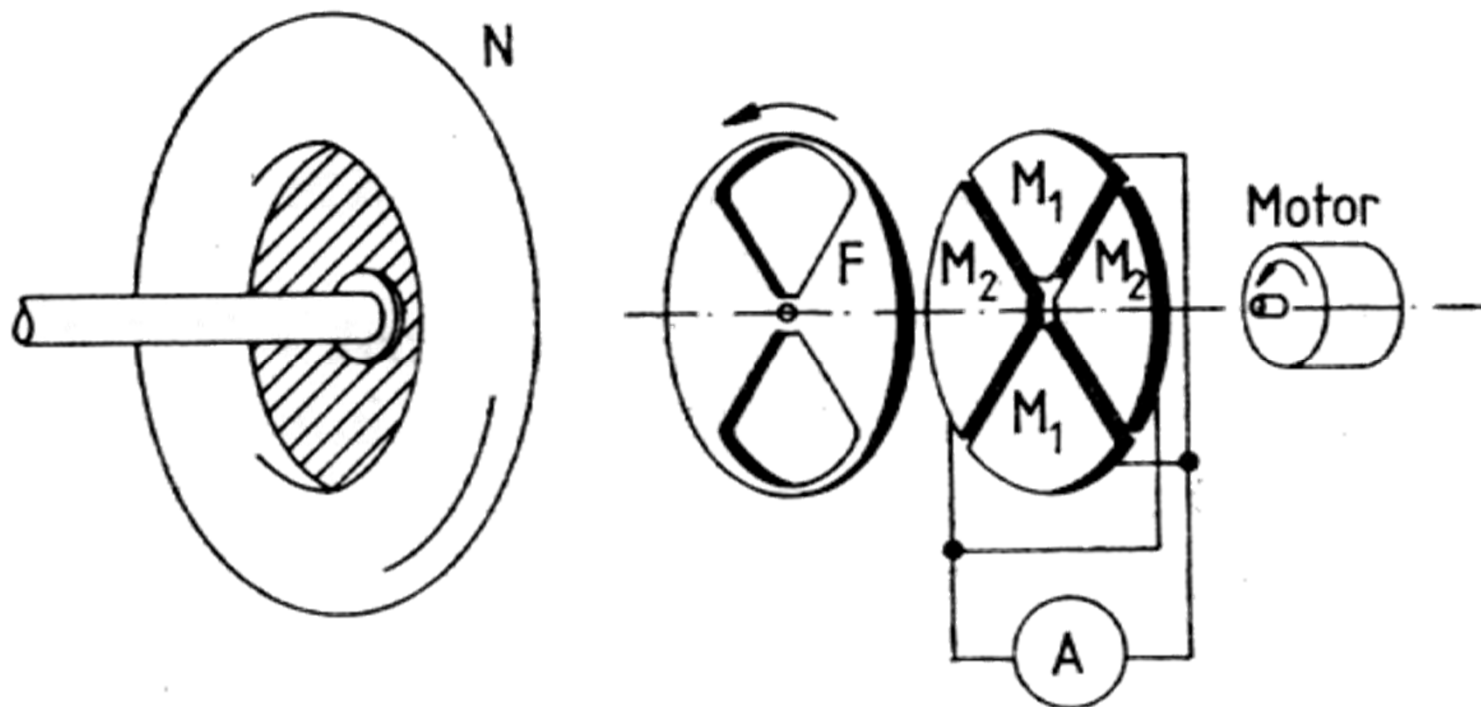
Rezgőkondenzátoros voltmérő elvi felépítése:



Generátor-elven működő voltmérők

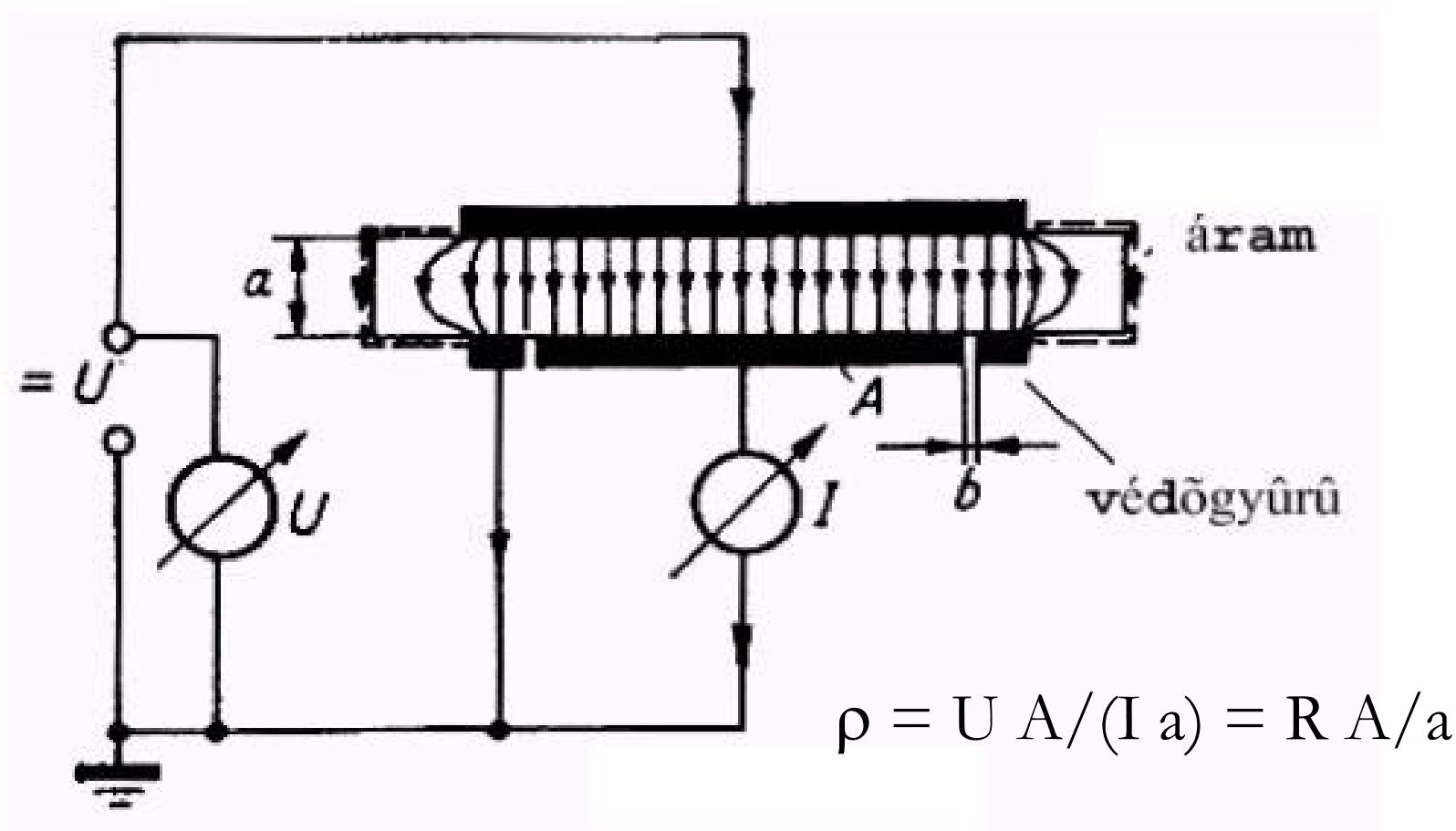
Rotorvoltmérő elvi felépítése:

N nagyfeszültségű elektród; F földelt árnyékoló elektród; M_1 és M_2 álló mérőelektródok



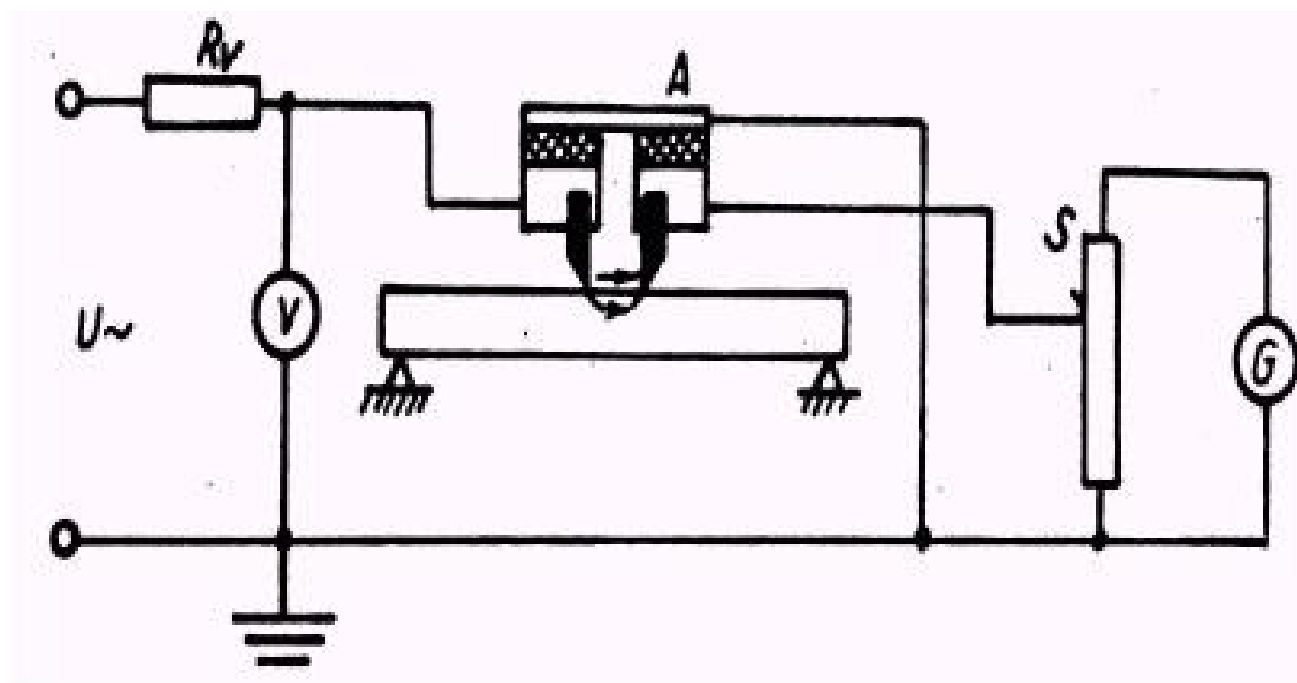
Fajlagos ellenállás mérése

Fajlagos térfogati ellenállás [ohm m]



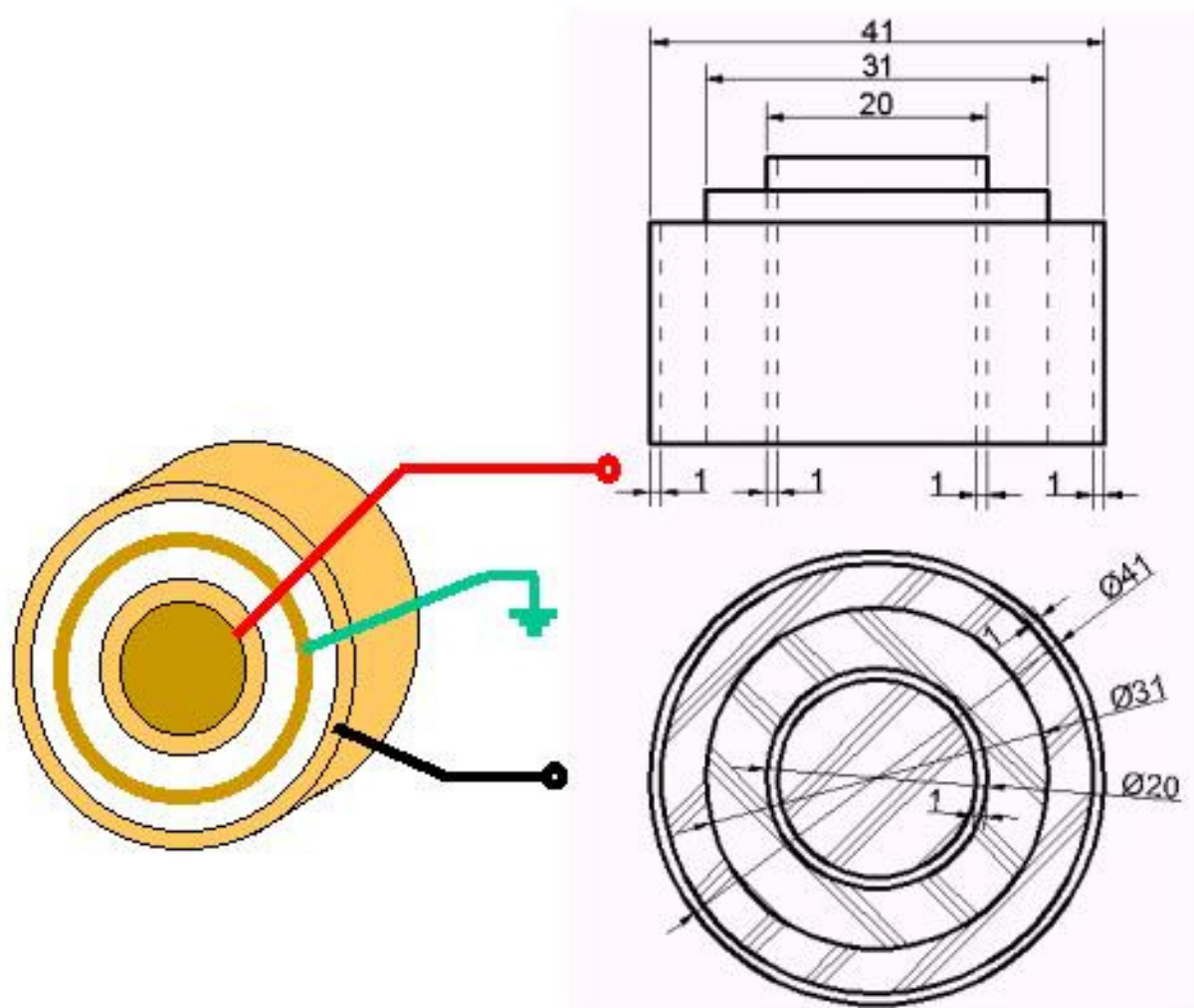
Fajlagos ellenállás mérése

Fajlagos felületi ellenállás [ohm]



Fajlagos ellenállás mérése

Fajlagos felületi ellenállás



**KÖSZÖNÖM
A
FIGYELMET!**